

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIULIANA LEANDRO

**MODELAGEM DE FRAGILIDADE AMBIENTAL USANDO ÍNDICES BASEADOS EM
DADOS ESPACIAIS E COM SUPORTE DE SISTEMA ESPECIALISTA.**

Curitiba

2013

DIULIANA LEANDRO

**MODELAGEM DE FRAGILIDADE AMBIENTAL USANDO ÍNDICES BASEADOS EM
DADOS ESPACIAIS E COM SUPORTE DE SISTEMA ESPECIALISTA.**

Tese apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Doutor em Ciências
Geodésicas, Setor de Ciências da Terra,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Centeno
Coorientadora: Prof. Dra. Claudia P. Krueger

CURITIBA
2013

Leandro, Diuliana

Modelagem de fragilidade ambiental usando índices baseados em dados especiais e com suporte de sistema especialista / Diuliana Leandro. – Curitiba, 2013.

133 f.: il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Jorge Centeno

Coorientadora: Claudia P. Krueger

1. Modelagem de dados. 2. Sistemas especialistas (Computação). 3. Impacto ambiental. 4. Mapeamento do meio Ambiente. I. Centeno, Jorge. II. Krueger, Claudia P. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD: 526.1

TERMO DE APROVAÇÃO

DIULIANA LEANDRO


"MODELAGEM DE FRAGILIDADE AMBIENTAL USANDO ÍNDICES BASEADOS EM DADOS ESPACIAIS E COM SUPORTE DE SISTEMA ESPECIALISTA"

Tese nº 85 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Antonio José Teixeira Guerra
Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ



Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro dos Santos
Departamento de Geografia, UFPR



Prof. Dr. Hideo Araki
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes
Departamento de Geomática, UFPR



Profª. Drª. Claudia Robbi Sluter
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 27 de fevereiro de 2013.

Dedicatória

Aos meus amados pais, Cecilia Leandro e Reinaldo Leandro.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Dr. Jorge Centeno pela orientação, pelos conselhos, confiança e motivação.

A Prof^a. Dra. Cláudia Pereira Krueger pela amizade, apoio, incentivo permanente e por todos os ensinamentos.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fomento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná por disponibilizar todos os recursos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa. A querida Monica Kleuser por ser solícita e pela amizade.

Agradeço também à todos os professores do Departamento de Geomática da UFPR que colaboraram com a minha formação.

A todos os amigos do PPGCG que diretamente ou indiretamente contribuíram nessa jornada, uns pelas simples conversas, outros pelas sugestões e pelas contribuições, a todos pelo companheirismo e incentivo em todos os momentos. Em especial Suelen Huinca, Karoline Jamur, Anderson Viski, Renata Werlich, Nassau Nardez, Fabiani Miranda, Wander, Marly, Luiz Fernando, Niarkios, João e Rogers.

A Marcos Basso por toda a ajuda na programação, sem sua ajuda o protótipo do SE não sairia! A André Mendonça pela amizade e por toda a disponibilidade para fazer minhas avaliações e sanar minha dúvidas! E a todos os especialistas que se disponibilizaram a participar das análises meus sinceros agradecimentos.

E finalmente, a toda minha família, em especial aos meus pais pelo apoio incondicional, e também pela minha formação moral e cultural.

“O ‘meio ambiente’ é o lugar onde vivemos, e o desenvolvimento é o que todos nós fazemos na tentativa de melhorar nossa morada. Os dois são inseparáveis”

Our Common Future (World Commission on Environment and Development)

“O que eu faço, é uma gota no meio de um oceano. Mas sem ela, o oceano será menor.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Os problemas ambientais vêm aumentando cada vez mais no país e a degradação de seus recursos naturais vem se acentuando drasticamente. Devido a esse quadro predatório é essencial buscar formas de estagnar essa situação ou minimizá-la através de conhecimento e quantificação do processo de degradação. As Ciências Geodésicas possui ferramentas que permitem quantificar e quantificar esses problemas. Este trabalho visa à verificação da criação de uma modelagem espacial para a determinação de índices de fragilidade ambiental. Verificou-se também a influencia de cada parâmetros na modelagem e a implementação de um protótipo de sistema especialista. Essa pesquisa galga através dos dados oriundos das Ciências Geodésicas em conjunto com outras ciências se gerasse subsídios para o planejamento e gerenciamento do território de maneira ambientalmente correta.

A modelagem desenvolvida, denominada IFA, foi baseada nos critérios declividade do terreno, cobertura vegetal e uso do solo, áreas de preservação, ocupação humana, tipo de solo, litologia e clima. Para as avaliações propostas nessa pesquisa se definiu três bacias hidrográficas para teste com diferenças significativas, principalmente, com relação à cobertura vegetal e uso do solo, e ação antrópica, estas foram: Bacia do Rio Belém, Bacia do Rio Cotia e Bacia do Rio Iraí. A metodologia dessa pesquisa se baseou em inicialmente se validar o modelo através de visitas *in loco* de especialistas de áreas específicas para a geração de pareceres das áreas de fragilidade. Diante dos resultados promissores dessa primeira etapa passou-se a ampliar a validação através da utilização de questionários, que permitiram coletar um número maior de pareceres de especialistas experientes em avaliações ambientais. Sequencialmente comparou-se o modelo IFA com os modelos Ross e Crepani utilizando a correlação espacial entre eles. Percebeu-se que a modelagem desenvolvida não apresenta alta correlação com nenhum dos dois modelos, porém a modelagem é uma junção das duas anteriores e permite uma delimitação detalhada de áreas com índice de fragilidade ambiental muito alto e alto.

Também se avaliou a contribuição de cada parâmetro na modelagem IFA através da geração de mapas de índices de fragilidade ambiental com parâmetros de entradas de dados diferentes. Outra discussão foi à verificação da influencia da variação da escala dos dados de entrada no modelo. E por fim examinou-se a possibilidade do desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista, também denominado IFA, no qual se implementou a modelagem IFA, assim como, Ross e Crepani.

Palavras Chaves: índice de fragilidade ambiental, modelagem, dados multiescalares

ABSTRACT

In Brazil, environmental matters are an increasing issue and the degradation of natural resources became a critical concern. Because of such predatory scenario, it seems mandatory to seek ways to stagnate this process or, at least, minimize it by means of knowing more of it. The Geodetic science has tools to measure the degradation processes concerning their location. The research presented here aims to verify the creation of a spatial model in order to determine indexes for environmental fragility. Also, the influence of each parameter for modeling was analyzed so as the implementation of a specialist system. Through data from spatial and environmental analysis, this research seeks to generate new information to support territory planning and management, according to what would be less destructive, considering preservation of natural resources. The developed model, called IFA, was developed based on the slope, vegetation cover and land use, protected areas, anthropism, soil type, lithology and climate classification. Three basins were used as study area for the purpose of the evaluations proposed by this research. These were the Belém River Basin, Cotia River Basin and Iraí River Basin, located in the region nearby Curitiba, Paraná, Brazil. Data was tested to seek for significant differences, especially with respect to vegetation cover and land use, and anthropic action. Initially, the method looked for the validation of the model through site visitation, carried out by professionals experienced in environmental assessments, in order to generate knowledge about degrees of fragility in these areas. Promising results of this first step made possible to extend the validation through the use of questionnaires, what allowed greater number of expert opinions. Sequentially the IFA model was compared with Ross and Crepani models, by means of the spatial correlation between them. It was perceived that the developed model did not show high correlation with any of the two existing models. Though this modeling allow detailed delimitation of areas with a high or very high environmental fragility index associated. Then, the contribution of each parameter to the proposed IFA model was measured, through maps built to gradually represent the environmental fragility indexes against different data inputs. Additional discussion was carried out in order to verify the influence of scale for modeling results. Finally, the development of a specialist system (also named IFA) was carried out in order to perform analysis using the Ross, Crepani and new IFA models.

Key word: environmental fragility, modeling spatial, multi-scale data

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DEFINIÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS.	25
FIGURA 2 – ARQUITETURA DE UM SE.	26
FIGURA 3 – EXEMPLO DE ÁRVORE DE DECISÃO.	31
FIGURA 4 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE ÁRVORE DE DECISÃO.	32
FIGURA 5 – ORGANOGRAMA DO SISTEMA ESPECIALISTA.	55
FIGURA 6 – AÇÃO ANTRÓPICA DA BACIA DO RIO IRAÍ.	56
FIGURA 7 – ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA AÇÃO ANTRÓPICA DA BACIA DO RIO IRAÍ.	57
FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.	61
FIGURA 9 – ÁREAS TESTES NAS BACIAS DO RIO BELÉM QUE FORAM AVALIADAS IN LOCO.	64
FIGURA 10 – VISTA GERAL DA ÁREA TESTE 01.	66
FIGURA 11 – VISTA GERAL DA ÁREA TESTE 02.	67
FIGURA 12 – VISTA GERAL DA ÁREA TESTE 03.	68
FIGURA 13 – VISTA GERAL DA ÁREA TESTE 04.	69
FIGURA 14 – ÁREAS TESTES NAS BACIAS DO RIO BELÉM, RIO IRAÍ E RIO COTIA.	72
FIGURA 15 – O GRÁFICO DE BARRAS MOSTRA A FORMAÇÃO, DOS ESPECIALISTAS EXPERIENTES QUE RESPONDERAM O QUESTIONÁRIO.	73
FIGURA 16 – O GRÁFICO DE SETORES CIRCULARES DO LADO ESQUERDO REPRESENTA OS ESPECIALISTAS COM EXPERIÊNCIA ALTA E MEDIANA E O DO LADO DIREITO TODOS OS QUE RESPONDERAM O QUESTIONÁRIO INTEGRALMENTE.	74
FIGURA 17 – ÁREA TESTE 03.	74
FIGURA 18 – CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIARAM NA CLASSIFICAÇÃO DA ÁREA TESTE 03 SEGUNDO ESPECIALISTAS EXPERIENTES.	75
FIGURA 19 – ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DETERMINADO PELO MODELO IFA PARA A TESTE 03.	76
FIGURA 20 – ÁREA TESTE 06.	77
FIGURA 21 – CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIARAM NA CLASSIFICAÇÃO DA ÁREA TESTE 06 SEGUNDO ESPECIALISTAS EXPERIENTES.	78
FIGURA 22 – ÁREA TESTE 08.	79
FIGURA 23 – CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIARAM NA CLASSIFICAÇÃO DA ÁREA TESTE 08 SEGUNDO ESPECIALISTAS EXPERIENTES.	80
FIGURA 24 – ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DETERMINADO PELO MODELO IFA PARA A TESTE 08.	81
FIGURA 25 – DETALHE DA BACIA DO RIO BELÉM DIFERENTES MODELOS.	84
FIGURA 26 – COMPARAÇÃO DA BACIA DO RIO COTIA COM DIFERENTES MODELOS.	87
FIGURA 27 – COMPARAÇÃO DA BACIA DO RIO IRAÍ COM DIFERENTES MODELOS.	89
FIGURA 28 – APLICAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS PARA A GERAÇÃO DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO BELÉM.	93
FIGURA 29 – APLICAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS, PARA A GERAÇÃO DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO COTIA.	94
FIGURA 30 – APLICAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS, PARA A GERAÇÃO DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ.	96
FIGURA 31 – VARIAÇÃO DOS ÍNDICES DE FRAGILIDADE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS DADOS.	98
FIGURA 32 – TÊNDECIA E VARIAÇÃO MÉDIA DOS DADOS.	100
FIGURA 33 – DETALHE DA BACIA DO RIO IRAÍ UTILIZANDO VARIAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS DADOS.	101
FIGURA 34 – TELA INICIAL DO PROGRAMA IFA.	119
FIGURA 35 – PROGRAMA IFA MODELO IFA APLICADO A BACIA DO RIO COTIA.	120

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PARÂMETROS DESCRITORES DO RELEVO.....	16
QUADRO 2 – TIPOS DE SOLO ASSOCIADOS AO GRAU DE FRAGILIDADE	17
QUADRO 3 – CARACTERÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS	18
QUADRO 4 – LITOLOGIA ASSOCIADA AO GRAU DE FRAGILIDADE	19
QUADRO 5 – GRAUS DE PROTEÇÃO POR TIPOS DE COBERTURA VEGETAL.....	21
QUADRO 6 – ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE EM FAIXA MARGINAL, MEDIDA A PARTIR DO NÍVEL MAIS ALTO, EM PROJEÇÃO HORIZONTAL, COM LARGURA MÍNIMA COM RELAÇÃO AO CURSO DE ÁGUA.	22
QUADRO 7 – ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE.	23
QUADRO 8 – ESCALAS DOS DADOS UTILIZADOS NO MODELO MATEMÁTICO PARA CLASSIFICAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL.	41
QUADRO 9 – ESCALA E RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS DADOS DE ORIGEM.....	43
QUADRO 10 – CLASSES DO RELEVO, SOLO E CLIMA.....	44
QUADRO 11 – CLASSES DAS ROCHAS.....	45
QUADRO 12 – DESCRITORES DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL EM FUNÇÃO DA OCUPAÇÃO HUMANA NA ÁREA.	45
QUADRO 13 – DESCRITORES DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL EM FUNÇÃO DA OCUPAÇÃO HUMANA NA ÁREA.	46
QUADRO 14 – CLASSES DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA MODELAGEM IFA.....	47
QUADRO 15 – PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS CLASSES DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA MODELAGEM IFA.	48
QUADRO 16 – INTERVALO DE CLASSES DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO.	50
QUADRO 17 – INTERVALO DE CLASSES DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DE CREPANI.	52
QUADRO 18 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS ANALISADAS.	63
QUADRO 19 – AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM ÁREA EM CADA CLASSE E ÍNDICE MÉDIO DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO BELÉM.	83
QUADRO 20 – AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM ÁREA EM CADA CLASSE E ÍNDICE MÉDIO DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO BELÉM.	85
QUADRO 21 – AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM ÁREA EM CADA CLASSE E ÍNDICE MÉDIO DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO COTIA.	86
QUADRO 22 – AVALIAÇÃO CORRELAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO COTIA.....	86
QUADRO 23 – AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM ÁREA EM CADA CLASSE E ÍNDICE MÉDIO DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ.....	88
QUADRO 24 – AVALIAÇÃO CORRELAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ.....	88
QUADRO 25 – VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA DA MODELAGEM DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO BELÉM COM VARIAÇÃO DA ENTRADA DE PARÂMETROS.....	92
QUADRO 26 – VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA DA MODELAGEM DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ COM VARIAÇÃO DA ENTRADA DE PARÂMETROS.....	93
QUADRO 27 – VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA DA MODELAGEM DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ COM VARIAÇÃO DA ENTRADA DE PARÂMETROS.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

APP	Área de Preservação Permanente
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Cfb	Subtropical mesotérmico úmido
CLIPS	C Language Integrated Production System
GIS	Geographic Information System
CNES	<i>Centre National d'Etudes Spatiales</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
SE	Sistema Especialista
SE's	Sistemas Especialistas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
UTM	Universal Transverse of Mercator
WGS	World Geodetic System

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	3
1.1.1 <i>Objetivos Específicos.....</i>	4
1.2 JUSTIFICATIVA	4
2. REVISÃO DOS ASPECTOS DE FUNDAMENTAÇÃO	7
2.1 FRAGILIDADE AMBIENTAL.....	7
2.2 MODELAGEM DA FRAGILIDADE AMBIENTAL	9
2.3 GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL	12
2.4 CRITÉRIOS (OU VARIÁVEIS) DE INTERPRETAÇÃO DE ÁREAS DE FRAGILIDADE	14
2.4.1 <i>Declividade do Terreno (Relevo)</i>	15
2.4.2 <i>Solo</i>	16
2.4.3 <i>Clima</i>	17
2.4.4 <i>Rochas</i>	18
2.4.5 <i>Cobertura Vegetal e Uso do Solo</i>	19
2.4.6 <i>Áreas de Preservação.....</i>	21
2.4.7 <i>Ocupação Humana</i>	23
2.5 SISTEMA ESPECIALISTA	24
2.5.1 <i>Aquisição do conhecimento</i>	27
2.5.2 <i>Motor de inferência</i>	27
2.5.3 <i>Exemplos de sistemas especialistas</i>	28
2.5.4 <i>Shells de sistemas especialistas</i>	29
2.6 ÁRVORE DE DECISÃO	30
2.7 QUALIDADE DOS DADOS ESPACIAIS	33
3. METODOLOGIA.....	37
3.1 UNIDADE DE MEDIDA	38
3.2 FONTE DE DADOS.....	40
3.3 ESTRUTURA, ESCALA E RESOLUÇÃO DE DADOS.....	41
3.3.1 <i>Estrutura de Dados</i>	41
3.3.2 <i>Escala e Resolução de Dados.....</i>	42
3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA MODELAGEM AMBIENTAL.....	44
3.5 PODERAÇÃO PARA OS CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	47
3.6 AVALIAÇÃO DO MODELO DE DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	50
3.6.1 <i>Proposição de avaliação do modelo de determinação de índices de fragilidade ambiental.....</i>	51
3.6.2 <i>Avaliação do modelo de determinação de índices de fragilidade ambiental baseada em questionário.....</i>	51
3.6.3 <i>Comparação de modelos de diagnóstico de índices de fragilidade ambiental existentes</i>	52
3.6.4 <i>Comparação de modelos de diagnóstico de índices de fragilidade ambiental com variação dos parâmetros de entrada de dados</i>	53
3.6.5 <i>Comparação de modelos com variações de escala de dados no modelo</i>	53
3.7 CRITÉRIOS DEFINIDORES DO SISTEMA ESPECIALISTA IFA	53

3.8 FUNDAMENTAÇÃO DE MAPEAMENTO NO SISTEMA ESPECIALISTA.....	58
4. EXPERIMENTOS	60
4.1 ÁREA DE ESTUDO	60
4.1.1 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Belém.....</i>	61
4.1.2 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Cotia.....</i>	62
4.1.3 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Iraí.....</i>	62
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.2.1 <i>Comparação do modelo IFA com parecer de fragilidade in loco.....</i>	63
4.2.1.1 <i>Conclusões com relação às análises in loco.....</i>	70
4.2.2 <i>Comparação do modelo IFA com questionários</i>	71
4.2.2.1 <i>Conclusões com relação ao uso do questionário.....</i>	82
4.2.3 <i>Comparação entre diferentes modelos existentes</i>	82
4.2.3.1 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Belém.....</i>	83
4.2.3.2 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Cotia.....</i>	85
4.2.3.3 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Iraí.....</i>	87
4.2.3.4 <i>Conclusões com relação aos diferentes modelos existentes.....</i>	90
4.2.4 <i>Contribuição de cada critério para determinação de índices de fragilidade ambiental.....</i>	91
4.2.4.1 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Belém.....</i>	92
4.2.4.2 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Cotia.....</i>	93
4.2.4.3 <i>Bacia Hidrográfica do Rio Iraí.....</i>	95
4.2.4.4 <i>Conclusões correlacionadas com a contribuição de cada critério na modelagem.....</i>	96
4.2.5 <i>Respostas das variações de escala de dados no modelo</i>	98
4.2.5.1 <i>Conclusões correlacionadas quanto às variações de escala de dados no modelo.....</i>	102
4.2.6 <i>Questões relacionadas à qualidade dos dados.....</i>	104
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
6. REFERÊNCIAS	108
7. REFERÊNCIAS CONSULTADAS	117
8. APÊNDICES	119
8.1 FORMULÁRIOS AUXILIARES A ANÁLISES IN LOCO.....	120
8.2 MODELO DE QUESTIONÁRIO	120
8.3 RESULTADOS DOS QUESTIONÁRIOS.....	120
8.4 MAPAS DAS 12 ÁREAS TESTES E SUAS CLASSIFICAÇÕES NA MODELAGEM IFA	120
8.5 MAPAS COM A COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES MODELOS EXISTENTES	120
8.6 MAPAS DE CONTRIBUIÇÃO DE CADA CRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	120
8.7 MAPAS DAS VARIAÇÕES DE ESCALA DE DADOS NO MODELO	120
8.8 MAPAS GERAIS.....	120
8.9 PROTÓTIPO DO SE IFA.....	120
8.10 ESTUDOS PRELIMINARES.....	120

1. INTRODUÇÃO

O meio ambiente, em função dos interesses econômicos e políticos, vem passando por processos de degradação que se acentuaram no último século. Isso tem causado uma drástica diminuição da qualidade de vida e um aumento da preocupação mundial em tentar reverter esse quadro (CUNHA E GUERRA, 2003). As soluções para esta reversão vêm através do conhecimento científico, da implantação de políticas de exploração racional e preservação dos recursos naturais.

Atualmente vários países, como, por exemplo, os Estados Unidos da América, Portugal, Alemanha e Polônia, vêm procurando impedir esses danos ao seu patrimônio natural e buscam melhorar a qualidade de vida da população através da adoção de políticas de planejamento e gestão desse patrimônio (LEANDRO et al., 2011). Esses perceberam que para gerar uma sociedade sustentável é necessário ter respeito pela natureza. O uso contínuo, e muitas vezes indiscriminado, desses recursos gera impactos ao meio ambiente, impactos que, ao longo do tempo, poderão se tornar uma limitação à continuidade do próprio processo de desenvolvimento da humanidade (BERTOTTI, 2006). Dentro dessa filosofia tem se tentado seguir os objetivos e valores disseminados pela declaração civil conhecida por “Carta da Terra” (MMA, 2010) e pela Agenda 21, os quais colocam em destaque medidas de estabelecimento, recuperação, controle e manejo ambiental. Pois, caso não haja essas iniciativas, o resultado será um desequilíbrio ambiental crescente que comprometerá cada vez mais a qualidade de vida humana.

O Brasil vem observando a necessidade de controle, preservação e planejamento de uso de seus recursos naturais e começa a investir em pesquisas para desenvolvê-los e preservá-los, porque percebeu que o custo para a recuperação de áreas afetadas por danos ambientais têm sido cada vez maior. Essas questões tem se refletido nas ações e políticas propostas pelo Ministério do Meio Ambiente (<http://www.mma.gov.br>). Quando se fala em custo, não é só o custo econômico, como também social e ambiental (perdas de plantas, animais e solo). Porém, esses danos podem ser evitados, ou pelo menos minimizados, e o primeiro passo para tal é adoção de políticas de planejamento e gestão ambiental, através do equacionamento correto dos problemas ambientais em cada região, pela

instauração de processos de diagnóstico utilizando índices de fragilidade ambiental. Isto significa criar meios que permitam o gerenciamento dessas áreas de maneira ambientalmente correta, pois o manejo inadequado dos recursos naturais é a principal causa da degradação ambiental, trazendo como impacto a erosão de solo, os desmatamentos, as desertificações entre outros.

Os órgãos gestores não podem considerar quantificar o impacto ambiental como um jogo de adivinhação e sim basear suas políticas de gestão e planejamento fundamentadas em informações suficientes para que se possa quantificar e qualificar esse impacto de forma prática. Neste contexto, as Ciências Geodésicas aparecem com base fundamental para a proposta de soluções. Essas podem colaborar com o processo de gestão e planejamento ambiental, já que permitem quantificar e qualificar as transformações ocorridas em determinados ambientes, através do monitoramento das variações espaciais da superfície da Terra, tanto geométrica como de uso e ocupação do solo, empregando técnicas como o sensoriamento remoto e o GNSS.

Uma ferramenta para a solução do problema de quantificação dos problemas ambientais é o uso dos dados espaciais para a modelagem e diagnóstico utilizando índices de fragilidade ambiental. Segundo Costa et al. (2009), o mapeamento da fragilidade ambiental permite avaliar as potencialidades do meio ambiente de forma integrada, compatibilizando suas características naturais com suas restrições. O mesmo autor considera que esse mapeamento constitui uma das principais ferramentas utilizadas pelos órgãos públicos na elaboração do planejamento territorial ambiental.

O presente trabalho propõe uma proposta de mapeamento de índices de fragilidade ambiental baseada em dados espaciais obtidos por técnicas de Ciências Geodésicas. Para a interpretação dos dados espaciais serem formatados adequadamente para a modelagem, é proposto o uso de um sistema especialista que analisa cada variável e a combinação de diferentes variáveis para inserir dados ao modelo. Também se investiga a viabilidade do emprego dessa modelagem e a geração de diagnósticos ambientais que possibilitem a geração de subsídios para, futuramente, permitir o gerenciamento dessas áreas de maneira ambientalmente correta.

Essa pesquisa é organizada em 8 capítulos. No capítulo 1 são apresentadas a introdução, os objetivos e justificativas desta pesquisa. Apresenta-se no capítulo 2 a fundamentação teórica do tema abordado. No capítulo 3 descreve-se a metodologia usada para delimitar a área de estudo, os materiais empregados, a caracterização das áreas de estudo, a ponderação dos critérios para a modelagem dos índices de fragilidade ambiental e a método de avaliação utilizado. O capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões decorrentes da aplicação da modelagem proposta nessa pesquisa sobre aspectos distintos como: a validação do modelo por especialistas, à relação com modelos consagrados, a contribuição de cada critério no modelo, as consequências da variação de escala dos dados nos resultados da modelagem. O capítulo 5 contém as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros. O capítulo 6 os materiais citados e o capítulo 7 os materiais consultados para o desenvolvimento dessa pesquisa. E, por último, no Capítulo 8 apresentam-se os formulários utilizados, os resultados desses questionários, todos os mapas gerados e o protótipo do sistema especialista IFA.

1.1 OBJETIVO GERAL

Considerando que os processos da natureza, resultam de interações espaço-temporais complexas entre os diversos elementos que os compõem, possam ser modelados para uma região, então se pode investigar a viabilidade do emprego de sistemas especialistas, baseados em árvores de decisão, para determinação de índices de fragilidade ambiental, porque existe a necessidade de gerar prognósticos ambientais que possibilitem a geração de subsídios para, futuramente, permitir o gerenciamento dessas de maneira ambientalmente correta.

Neste contexto, o objetivo geral desta pesquisa é desenvolver uma metodologia para a geração de mapas de índices de fragilidade ambiental através de um sistema especialista baseado em árvore de decisão considerando os seguintes aspectos: declividade do terreno, cobertura vegetal, uso do solo, tipo de solo, litologia, clima, ocupação humana e existência de áreas de preservação.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Definir e ponderar critérios visando identificação dos índices de fragilidade ambiental;
- b) Desenvolver regras para a conexão dos critérios de identificação;
- c) Gerar o modelo para determinação de índices de fragilidade ambiental;
- d) Avaliar a viabilidade do uso de sistemas especialista para prognóstico de áreas de fragilidade;
- e) Avaliar os resultados gerados em função das ponderações dos parâmetros do modelo IFA utilizando visitas in loco;
- f) Avaliar os resultados gerados em função das ponderações dos parâmetros do modelo IFA utilizando questionários;
- g) Comparar a modelo IFA com modelos de Ross e Crepani;
- h) Avaliar a contribuição de cada parâmetro na modelagem proposta;
- i) Avaliar o que a variações de escala de dados no modelo provoca nos resultados finais;
- j) Desenvolver um protótipo de Sistema Especialista;

1.2 JUSTIFICATIVA

O crescente desenvolvimento científico e tecnológico da sociedade vem exigindo que muitas tarefas complexas sejam executadas de forma mais ágil e precisa. Neste contexto, surgiram os sistemas especialistas, fruto da aplicação da chamada engenharia do conhecimento, uma das subáreas da inteligência artificial. Estes sistemas foram desenvolvidos para simular a atuação de peritos humanos e têm encontrado aplicações em diversas áreas como: a medicina, a educação, as engenharias, as finanças, entre outras.

Nos sistemas especialistas a aquisição do conhecimento é considerada a parte mais sensível e importante no seu desenvolvimento, porque envolve a transferência do conhecimento humano para o sistema, envolve questões filosóficas, heurísticas e

técnicas. Este sistema, depois de desenvolvido, não pode se restringir à base de conhecimento inicial deve possuir capacidade de receber novos conhecimentos.

Embora os sistemas especialistas tenham sido desenvolvidos em diversas áreas das ciências, atualmente ainda existem campos em que foram poucos explorados, como na utilização de análises espaciais. Isso ocorre porque muitos pesquisadores consideram que os sistemas especialistas não podem ser adequados para representar o conhecimento temporal ou espacial. Segundo Schwabe e Carvalho (1987), representações deste tipo requerem muita memória, para situar várias informações no tempo ou registrar relações espaciais entre diversos grupos de objetos. Porém, esses problemas, desapareceram com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento tecnológico.

Questões como a integração de dados de diversas áreas, para uma visão holística do ambiente natural, considerando este, como um sistema integrado de vários elementos, tem tido pouco enfoque dentro das pesquisas nas Ciências Geodésicas. É importante abordar o ambiente natural como um geossistema, o qual, segundo Christofolletti (1995), define como a junção dos elementos: topográficos, biogeográficos, hidrológicos, pedológicos e dinamizados pelos fluxos climáticos em conjunto com a ação e os fluxos relacionados às atividades humanas.

As modelagens para a determinação dos índices de fragilidade existentes como a de Ross (1994) e Crepani (1996) são bastante subjetivas, e discrepantes entre si, nesta pesquisa, busca-se a preposição de uma metodologia para uma nova modelagem juntamente com a validação desta. Isso permite avanços no método, como a verificação da adequabilidade das ponderações dos parâmetros.

Outro ponto importante é que grande parte de estudos ambientais publicados na literatura vêm sendo desenvolvidos de maneira a trabalhar com dados em múltiplas escalas, gerando resultados com pouco ou nenhuma discussão sobre a qualidade dos aspectos espaciais do problema abordado. Tal discussão é de extrema importância, uma vez que, processos ambientais, em geral, são completamente dependentes da escala em que são tratados e modelados. E da mesma forma que, na Geomática, devem existir estudos que identifiquem o papel da escala de coleta, de análise e de representação num determinado processo ambiental. Porém, isso não significa que haja uma escala única e correta para tratar um determinado fenômeno. A representação em diferentes escalas permite a representação de

informações diferentes útil a diferentes aplicações (CHAUDAHRY, 2007). Mas a discussão sobre a qualidade dos resultados gerados é de suma importância dentro de qualquer área, pois é essencial saber até que ponto esses são confiáveis.

Dentro deste contexto, esta pesquisa galga desenvolver uma modelagem para mapeamento de índices de fragilidade ambiental juntamente com parte dos conhecimentos que as Ciências Geodésicas oferecem, no qual se possam utilizar dados geográficos, informações de imagens de satélites, fotografias aéreas, informações geológicas e hidrográficas, dados geodésicos gerados por posicionamento por GNSS e outras informações relevantes, visando gerar subsídios para a avaliação de riscos ambientais. Nesta modelagem cada tipo de informação é recebido com um determinado peso, dependendo do nível de influência sobre a região, permitindo determinar os riscos ambientais, as áreas de preservação; podendo qualificá-los e quantificá-los com bases em conhecimentos de várias áreas: das ciências geodésicas, da geologia, da hidrologia, da ecologia, e áreas afins. Verificou-se ainda a possibilidade do uso de sistema especialista baseado em árvore de decisão para a modelagem dos índices de fragilidade ambiental.

2. REVISÃO DOS ASPECTOS DE FUNDAMENTAÇÃO

Para o desenvolvimento desta tese existe a necessidade da contextualização em que a pesquisa está inserida, nesse capítulo são apresentados os conceitos básicos de fragilidade ambiental, gestão e planejamento ambiental, modelagem de fragilidade ambiental, critérios para determinação de áreas de fragilidade ambiental, qualidade de dados espaciais, sistema especialista. Enfim, são introduzidas as argumentações básicas necessárias reforçar e apoiar o objeto desta pesquisa.

2.1 FRAGILIDADE AMBIENTAL

Em muitas pesquisas o termo fragilidade ambiental, risco ambiental, vulnerabilidade ambiental, sensibilidade ambiental aparecem como sinônimos. De acordo com Spörl (2007), o termo fragilidade ambiental está ligado à susceptibilidade do sistema de sofrer intervenções, ou de ser alterado. O mesmo autor define o termo fragilidade do meio ou risco ambiental, como o perigo ou possibilidade de perigo ou perda, que estão vinculadas à percepção humana da dinâmica da natureza. Segundo Ramos et al. (1987), por fragilidade ou vulnerabilidade do meio ambiente se entende o grau de suscetibilidade ao dano, ante a incidência de determinadas ações. O autor definiu também fragilidade como o inverso da capacidade de absorção de possíveis alterações sem que haja perda de qualidade. Moreira (1990) considera que o conceito fragilidade diz respeito à susceptibilidade do meio ambiente a qualquer tipo de dano, inclusive à poluição. Tagliane (2003) define vulnerabilidade ambiental como a maior ou menor susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer. Para tal, o autor avalia a fragilidade estrutural intrínseca (condicionada por características inerentes ao substrato físico e que descrevem seus materiais, formas e processos, sintetizando suas relações), a sensibilidade (proximidade de recursos hídricos, proximidade de comunidades vegetais sob proteção legal) e o grau de maturidade dos ecossistemas (condicionada pelo tempo de evolução, uma das características que determinam a fragilidade relativa dos ecossistemas frente a perturbações antrópicas).

O conceito de “áreas sensíveis ambientalmente” surgiu há 30 anos em países industrializados (CORVALÁN, 2009). Esse mesmo autor define como áreas sensíveis as porções da paisagem que contem feições naturais ou culturais importantes para o funcionamento de um ecossistema e podem ser negativamente impactadas por atividades humanas.

No entanto, ao discutir os conceitos de fragilidade ambiental, é importante lembrar, que os fenômenos da natureza se modificam com maior ou menor intensidade em função do tempo e do espaço (BURROUGH E MCDONNELL, 1998). Inicialmente, deve-se considerar que o meio ambiente apresenta um equilíbrio dinâmico, ou seja, a paisagem se modifica continuamente devido basicamente a processos naturais, como por exemplo, o regime de chuvas e a erosão. Com o progresso da sociedade, o homem passou a fazer parte desse processo como um elemento ativo, capaz também de modificar a paisagem. Segundo Macedo (1995), a vulnerabilidade ambiental consiste em qualquer conjunto de fatores ambientais de mesma natureza que, diante de atividades ocorrentes ou que venham a se manifestar, poderá sofrer adversidades e afetar, de forma vital ou total ou parcial, a estabilidade ecológica da região em que ocorre.

As modificações nos solos, vegetação, aspectos hidrológicos, apropriação de recursos naturais, entre outras alterações no meio ambiente devido à intensa intervenção humana, vêm provocando alterações irreversíveis, propiciando desequilíbrio, colapso ou readaptação da paisagem. Esse novo quadro global torna essencial associar o homem e meio ambiente no estudo de fragilidade ambiental, pois de acordo com ROSS (1995), entendimentos parciais da realidade podem induzir a decisões erradas ou insatisfatórias para efetuar um planejamento ambiental para o uso do solo. Neste mesmo contexto, Cunha e Guerra (1995) colocam que:

‘O conhecimento das potencialidades dos recursos naturais de um determinado sistema natural passa pelos levantamentos dos solos, relevo, rochas e minerais, das águas, do clima, da flora e fauna, enfim, de todas as componentes do estrato geográfico que dão suporte à vida animal e ao homem. Para análise da fragilidade, entretanto, exige-se que esses conhecimentos setorizados sejam avaliados de forma integrada, calcada sempre no princípio de que na natureza a funcionalidade é intrínseca entre as componentes físicas, bióticas e sócio-econômicas.

As fragilidades dos ambientes naturais devem ser avaliadas quando se pretende aplicá-las ao planejamento ambiental, baseando-se nos conceitos de Unidades Ecodinâmicas preconizadas por Tricart (1977). Dentro dessa concepção ecológica o ambiente é analisado sob o prisma da Teoria dos Sistemas que parte do pressuposto de que na natureza as trocas de energia e matéria se processam através de relações de equilíbrio dinâmico. Esse equilíbrio, entretanto, é frequentemente alterado pelas intervenções do homem nas diversas componentes da natureza, gerando estado de desequilíbrio temporário, ou até permanentes. Diante disto Tricart (1977) definiu que os ambientes, quando estão em desequilíbrio são instáveis. '

Os estudos realizados por Ross (1994) recomendaram dois novos conceitos fragilidade potencial e fragilidade emergente, o primeiro relaciona os fatores naturais da paisagem como a geomorfologia, tipos de solo, declividade, geologia entre outros; e o segundo esta relaciona a fragilidade potencial com a cobertura do solo e as intervenções antrópicas.

A fragilidade potencial de uma área pode ser definida como a vulnerabilidade natural que um ambiente apresenta em função de suas características físicas como a declividade e o tipo de solo, já a fragilidade emergente considera, além das características físicas, os graus de proteção que os diferentes tipos de uso e cobertura vegetal exercem sobre o ambiente (KAWAKUBO et al., 2005).

Nessa pesquisa considerou-se fragilidade ambiental a susceptibilidade do sistema de sofrer interferências, integrando suas características intrínsecas (tipo de solo, declividade, litologia) associadas às características extrínsecas, como por exemplo, ações antrópicas e uso do solo.

2.2 MODELAGEM DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

Atualmente devido à intensificação dos problemas ambientais e a sua repercussão sobre a qualidade de vida humana muitas metodologias vem sendo desenvolvidas e avaliadas para determinação de riscos ambientais. Essas metodologias buscam, através de representações por modelos matemáticos, aritméticos e lógicos, simular os processos do mundo real aumentando os conhecimentos sobre as áreas.

Por modelo entende-se ser um procedimento de qualquer natureza (prático, matemático, gráfico, verbal) capaz de, em todos os aspectos relevantes, reproduzir uma relação de antecedentes (causas) e consequentes (efeitos) de forma semelhante à que ocorre na realidade em que nos inserimos. Os modelos concentram-se nos aspectos relevantes e, portanto, correspondem a uma simplificação do evento em si, e proporcionam as vantagens da condução ao conhecimento resultante de um processo sem que o evento ocorra de fato na natureza. (TRZESNIAK, 1998)

Uma das primeiras metodologias apresentadas para analisar a inter-relação dos fatores ambientais, que são responsáveis pela modelagem do relevo, e os aspectos ecológicos, utilizando a análise quantitativa e qualitativa de vários ambientes, foi desenvolvida por Tricart, no fim da década de setenta. Para Tricart, o conceito de ecodinâmica sugere um modelo de avaliação integrado das unidades territoriais, com base no balanço pedogênese¹/morfogênese², propiciando sua classificação quanto aos graus de instabilidade (Silveira et al, 2005). O conceito de unidades ecodinâmicas é integrado no conceito de ecossistema, baseia-se no instrumento lógico de sistema, e enfoca as relações mútuas entre diversos componentes da dinâmica e os fluxos de energia/matéria no meio ambiente (TRICART, 1977).

Em 1991, Ross adaptou o modelo proposto por Tricart, e desenvolveu uma metodologia para classificar a fragilidade ambiental através da inter-relação dos elementos do meio físico e biótico. Já em 1994, esse mesmo autor, propôs uma nova metodologia na qual inseriu ao modelo a inter-relação dos ambientes naturais e a intervenção humana. De acordo com Ross (1994), os índices de fragilidade dos ambientes naturais devem ser resultantes dos levantamentos básicos de geomorfologia, solos, cobertura vegetal/uso da terra e clima. Nessa metodologia as variáveis são ponderadas de forma distinta, em diferentes categorias hierárquicas, sendo que a declividade tem maior contribuição para a determinação dos índices de fragilidade ambiental.

¹ Pedogênese é o processo natural de formação química e física do solo (adição, remoção, transporte e modificação).

² Morfogênese é o processo de modelagem do relevo em sistemas naturais relacionado à erosão.

Outra metodologia baseada no modelo de Tricart é de Crepani (2001), o qual utiliza a elaboração de mapas de Unidades Territoriais Básicas³, as quais são definidas através de imagens de satélite e posteriormente são associadas a informações pré-existentes, como por exemplo, mapas geológicos, cobertura vegetal e dados de intensidade pluviométrica.

Neste método cada unidade básica recebe uma determinada pontuação de fragilidade, que, de acordo com Spörl (2007), varia de 1 a 3, sendo que as unidades mais estáveis apresentarão valores mais próximos de 1, as intermediárias ao redor de 2 e as mais vulneráveis estarão próximas de 3. Nessa metodologia considera-se que todas as variáveis possuem a mesma importância no modelo, pois para todas é dado o mesmo peso para definir o grau de fragilidade.

Os métodos de Ross e Crepani para determinação dos índices de fragilidade ambiental basicamente utilizam as mesmas variáveis, porém as ponderam de forma distintas. O modelo de Crepani utiliza como variáveis: índice de dissecação do relevo, solo, rocha, cobertura vegetal/uso da terra. Já o modelo de Ross não utiliza rochas (litologia) em sua modelagem. Estes dois modelos de análise possuem ponderações distintas para cada uma das variáveis. Sendo que Ross dá mais importância à variável relevo, enquanto que Crepani pondera igualmente todas as variáveis. E isso faz com que elas acabem retornando resultados distintos quanto aos índices de fragilidade associados a cada área, isso se deve à dificuldade dos modelos serem ajustados para fenômenos complexos da natureza.

Diante desse contexto, Spörl, em 2007, publicou sua pesquisa baseada no aperfeiçoamento destes modelos para o desenvolvimento de uma nova metodologia utilizando redes neurais artificiais. No desenvolvimento de seu modelo, Spörl, buscou substituir a ponderação empírica das variáveis envolvidas no processo por resultados obtidos através do treinamento de redes neurais. Durante o processo de treinamento das redes neurais utilizou o conhecimento de seis especialistas para avaliarem um cenário simulado, inclusive Crepani e Ross. Ela percebeu através dos ambientes simulados, que havia uma forte sintonia no modo de pensar durante a

³ Unidade Territorial Básica é uma entidade geográfica que contém atributos ambientais que permitem diferenciá-la de suas vizinhas (CREPANI, 1996) e podem ser divididas em duas categorias, “unidades de paisagem natural” e os polígonos de ação antrópica” (SPÖR, 2007).

avaliação da fragilidade pelos especialistas, no entanto, quando se aplica o modelo de determinação dos índices de fragilidade esses são pouco compatíveis. Mesmo havendo discrepâncias entre os modelos Crepani e Ross, estas não fazem com que se possa definir qual deles consegue demarcar as áreas de fragilidade de forma mais eficiente, os resultados variam dependendo do cenário em que são aplicados.

Uma das colocações bastante interessantes de Spörl (2007) é quanto às limitações para a representação da correlação entre as variáveis envolvidas através de sistemas lineares, como os desenvolvidos por Crepani e Ross. A autora também coloca que vários outros autores argumentam que os sistemas ambientais são processos evolutivos, ou seja, não lineares, irreversíveis e com estados longe do equilíbrio, dessa forma as abordagens lineares, objetivas e determinísticas sobre a questão ambiental são ineficientes.

Nesse mesmo contexto, para Felgueiras (2001), os processos da natureza resultam de interações espaço-temporais complexas e essa complexidade pode incluir comportamento não linear, componentes estocásticos e realimentações em múltiplas escalas de tempo e de espaço. E esses modelos de simulação ambiental fornecem diagnósticos e saídas preditivas, que podem ser combinadas com dados socioeconômicos, para avaliação de riscos ambientais regionais e locais ou decisões relacionadas com o gerenciamento de recursos naturais (STEYAERT, 1993).

2.3 GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

Conforme foi citado anteriormente, a determinação dos índices de fragilidade ambiental é essencial para inserção de processos de gestão e planejamento ambiental. Considera-se que a degradação ambiental acontece em toda parte, com maior ou menor intensidade, em função da maneira de como os recursos naturais são utilizados e a maneira de gerir essa utilização pode acentuar ou minimizar esses impactos ambientais.

Philippi Jr. et al. (2004), coloca que o processo de gestão ambiental inicia-se quando se promovem adaptações ou modificações no ambiente natural. Segundo o mesmo autor para uma gestão ambiental consciente é necessário conhecer todas as variáveis envolvidas, isso significa dizer que o conhecer precede ao agir.

Dentro deste contexto, pode-se entender gestão como o ato de administrar os ecossistemas naturais e sociais em que se insere o homem, de forma a conservar a harmonia entre o homem e seu meio, preservando os recursos naturais e as características fundamentais do seu entorno.

O planejamento ambiental é uma ferramenta administrativa que permite perceber a realidade e entender os processos relacionados. Isso por meio de análises de todas as questões envolvidas, objetivando estratégias e ações que permitam o desenvolvimento sustentável dessas áreas. O planejamento é constituído por procedimentos organizados com função de escolher as melhores alternativas para atingir determinados fins (SETTI, 2001). E para isso, segundo Vettorazi (2006), são necessários estudos integrados que selecionem e sistematizem informações sobre a área ou local onde ele será aplicado e identifique o estado do ambiente, a pressão exercida sobre ele e a resposta dada pela sociedade para a sua melhoria. Segundo Kawakubo et al (2005), o mapa de fragilidade ambiental constitui-se numa das principais ferramentas utilizadas pelos órgãos públicos na elaboração do planejamento territorial ambiental.

O planejamento também serve como uma ferramenta de apoio à gestão de bacias hidrográficas, sendo um processo de criação e desenvolvimento de metas e ações com o objetivo de melhorar a qualidade de vida das comunidades humanas que dependem dos recursos dessas bacias, levando em consideração a manutenção da diversidade biológica e a produtividade desses ecossistemas.

É importante considerar que o processo de planejamento deve ser cíclico e prático, nas decisões selecionadas e também contínuo. É necessário que haja uma constante realimentação de situações, propostas, resultados e soluções. Desta forma é conferido a ele dinamismo, fundamentado na multidisciplinaridade e interatividade, num processo ininterrupto de tomada de decisões.

Outra questão essencial é que o processo de planejamento deve se adaptar às características regionais como: as estruturas políticas e administrativas, as condições econômicas, os modelos culturais, e as tradições. Dessa forma é possível buscar o desenvolvimento sustentável para as áreas em que os aplica; qualifica o crescimento econômico, sujeitando-o à necessidade de manutenção, em longo prazo, da produtividade dos recursos naturais e conservação da base física do

planeta; fortalece a ideia de equidade, tanto interpessoal (sustentabilidade social), como intertemporal (sustentabilidade ambiental) (ANEEL, 2002).

‘Se a ocupação for de uma bacia hidrográfica, por exemplo, o planejamento deve incluir os seguintes aspectos: proteção das vidas humanas e propriedades; proteção da qualidade e reservas de água; proteção da vida selvagem e dos ecossistemas; cuidado com o acesso às áreas mais frágeis e gerenciamento de áreas de lazer dentro de uma perspectiva de sustentabilidade do sítio a ser preservado’ (Cunha e Guerra, 2005).

Segundo Lanna (1995), a gestão ambiental é um processo de articulação das ações de diferentes agentes sociais que interagem em determinado espaço, para garantir a adequação dos meios de exploração dos recursos naturais às especificidades do meio ambiente, com bases em diretrizes estabelecidas. A gestão ambiental utiliza-se do planejamento ambiental para, na prática, regular o uso, o controle, a proteção e conservação dos recursos naturais que devem ser estabelecidos por políticas ambientais.

Gerir racionalmente, metodicamente, um ambiente, significa acompanhar a evolução dos fenômenos de interesse, comparando as situações encontradas no presente com as que foram previstas no plano de ação e, principalmente, promover a intervenção quando realmente necessária, segundo informação relevante e baseada em novos dados, mediante o consentimento da autoridade competente (XAVIER-DA-SILVA, 2001). E o mesmo autor afirma que gestão implica em decisão e não é recomendável decidir sem informação confiável e atualizada.

2.4 CRITÉRIOS (OU VARIÁVEIS) DE INTERPRETAÇÃO DE ÁREAS DE FRAGILIDADE

Segundo Spörl & Ross (2004), os sistemas ambientais, face às intervenções humanas, apresentam maior ou menor fragilidade e qualquer alteração nos diferentes componentes da natureza (relevo, solo, vegetação, clima e recursos hídricos) acarreta o comprometimento da funcionalidade do sistema, quebrando o seu estado de equilíbrio dinâmico.

‘As realidades se sucedem ao longo do tempo e deixam marcas, evidências, retratos em forma de paisagens. Elas, em si, são imutáveis. O que muda ao longo do tempo do homem, é a interpretação que ele faz. As interpretações nada mais são do que a inspiração de se chegar cada vez mais próximo da verdade, ou seja, da “real realidade”. Para os diversos caminhos da interpretação, pratica-se a observação e análise dessas marcas, dessas evidências e desses retratos deixados pela história, fragmentados nos elementos que compõem o meio. Esses, num primeiro momento, são identificados pelo “dado”, ou seja, pelo princípio ou base imediata do conhecimento sobre o meio, ainda não construído ou elaborado. A decisão sobre o planejador sobre a representação, valor e relação entre os dados é que conduz à determinação dos “indicadores”. São novas composições, infinitamente arranjadas, desse imenso fractal de indicadores que permite o avanço do conhecimento sobre o meio ambiente e que permite ter, por fim, a construção de reproduções cada vez mais representativas de todo e da verdade’. (SANTOS, 2004).

O planejamento ambiental pode utilizar dados de diversas naturezas, a decisão pelo dado a ser utilizado depende muito da área do conhecimento envolvida no estudo. Neste capítulo são apresentados os critérios utilizados em metodologias desenvolvidas para a análise ambiental da fragilidade, propostos por Ross (1994), Crepani et al. (1996) e verificados por Spörl & Ross (2004): declividade do terreno, clima, litologia, cobertura vegetal e uso do solo. Outros dois critérios utilizados foram: identificação de áreas de preservação e ocupação humana da área em estudo.

2.4.1 Declividade do Terreno (Relevo)

A inclinação do terreno em relação à horizontal condiciona e repercute em fatores como: formas de relevo, erosão, potencialidades para uso agrícola, restrições para ocupação urbana, manejos e práticas conservacionistas (SANTOS, 2004). O relevo exerce uma grande influência nas características dos solos, na sua condição hídrica e térmica, ele refere-se à configuração superficial da crosta terrestre.

As análises básicas do relevo de um modo geral podem, segundo Guerra & Cunha (2003), utilizar as classes já consagradas nos estudos de uso/aptidão agrícola, associados com aqueles conhecidos como valores limites críticos da

geotécnia, indicativos respectivamente do vigor dos processos erosivos, dos riscos de escorregamentos/deslizamentos e inundações frequentes.

O relevo é modificado continuamente através de fenômenos naturais contínuos de dinâmica externa, que modelam a paisagem da superfície através de ação de intemperismo e erosão. Algumas áreas são mais suscetíveis a tal processo que outras, e isso depende de vários fatores, como do tipo de solo da região, da declividade assim como da cobertura vegetal e do uso do solo.

O fator declividade influencia diretamente no tipo de drenagem e consequentemente no processo de erosão, porque, as chuvas, quando torrenciais ou constantes, arrastam imensas quantidades de solo. Por exemplo, nas partes altas e relativamente planas, os solos apresentam boa drenagem interna, nas encostas com declives mais acentuadas apresentam drenagem boa ou excessiva, porém são mais secos, enquanto que nas partes inferiores das vertentes e áreas de várzea e/ou depressões há predominância de água na massa do solo durante o ano (GUERRA & CUNHA, 2003). Áreas com declividade inferior a 10% são áreas que de modo geral apresentam baixa susceptibilidade a deslizamentos. Áreas com declividade acentuada são classificadas como áreas de alto risco de deslizamento. No Quadro 1, apresentam-se os parâmetros descritores do relevo que serão utilizados no decorrer desse trabalho.

Tipo de Relevo	Declividade	Fragilidade
Plano	Até 6%	Muito Baixa
Suavemente ondulado	6-12%	Baixa
Ondulado	12-20%	Média
Abrupto	20-30%	Alta
Muito Abrupto	>30%	Muito Alta

QUADRO 1 – PARÂMETROS DESCRITORES DO RELEVO

FONTE: Adaptada de Ross, 1994.

2.4.2 Solo

O solo é formado por um conjunto de corpos naturais tridimensionais, resultantes da ação integrada do clima e organismos sobre o material de origem, condicionado pelo relevo em diferentes períodos de tempo (PALMIERI & LARACH, 2003) e essas características dependem do equilíbrio dinâmico do meio ambiente. De acordo com

Schiavetti e Camargo (2002), o tipo de solo interfere diretamente na velocidade de infiltração da água no solo e na capacidade de retenção da água sobre a superfície, o que determina a resistência ou não a erosão. A metodologia proposta por Ross (1994) criou uma hierarquização da fragilidade ambiental de vários tipos de solo levando em consideração a textura, o grau de coesão das partículas, estrutura e plasticidade dos solos (Quadro 2). Por exemplo, a textura dos solos é a característica que influencia se um tipo de solo pode sofrer maior ou menor arraste de partículas das chuvas.

Valor	Tipos de Solo	Fragilidade
1	Latossolo Bruno, Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho amarelo textura argilosa.	Muito Baixa
2	Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/ argilosa.	Baixa
3	Latossolo Vermelho amarelo, Argilosos	Média
4	Argissolos textura média/arenosa, Cambissolos	Alta
5	Neossolos, Organossolos	Muito Alta

QUADRO 2 – TIPOS DE SOLO ASSOCIADOS AO GRAU DE FRAGILIDADE
FONTE: ROSS, 1994.

As características dos solos variam em vários aspectos, e essas são determinadas pelo clima, topografia, os materiais de origem a biota e o tempo.

2.4.3 Clima

O clima é uma generalização ou integração das condições do tempo para um determinado período, em uma determinada área (SCHIAVETTI & CAMARGO, 2002). Esse é classificado através elementos e fatores climáticos, o primeiro são grandezas que quantificam o clima (temperatura, pressão atmosférica, evaporação, entre outros). O segundo relaciona fatores que condicionam a regularidade do clima em determinada área, como, por exemplo: relevo do local, latitude, distância de corpos de água.

O intemperismo é controlado diretamente pelo clima através da precipitação pluviométrica e da temperatura (SPÖRL, 2007). E esse é um condicionante ecológico para fauna e flora, também para a evolução do relevo. O tipo climático de uma região é uma informação importante nas atividades de planejamento, já que

condiciona toda a dinâmica do ambiente. No Quadro 3 são apresentadas as características pluviométricas associadas ao índice de fragilidade ambiental.

Índice de Fragilidade	Características Pluviométricas
Muito Baixo	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes não muito superiores a 1000mm/ano
Baixo	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000mm/ano
Médio	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses de inverno, e no verão com maiores intensidades de dezembro a março
Alto	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 3 e 6 meses, e alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril quando ocorrem de 70 a 80% do total de chuvas
Muito Alto	Situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900mm/ano (semi-árido)

QUADRO 3 – CARACTERÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS

FONTE: Adaptado de Spörl, 2007.

2.4.4 Rochas

Outro fator determinante da potencialidade de erosão de uma determinada área está relacionado à sua litologia, ou seja, quanto ao tipo de rocha de que é constituída, quais as suas características físicas (composição mineral, distribuição e tamanho dos grãos, cor, textura, estrutura e grau de compactação dos sedimentos ou rochas). Nesta pesquisa se utilizou uma escala de grau de fragilidade desenvolvida por Crepani para as litologias mais comumente encontradas, relacionando-as a sua resistência ao intemperismo, como pode ser observado no Quadro 5.

Tipos de Rochas	Litologias	Grau de Vulnerabilidade	Índice de Fragilidade Ambiental
Metamórficas	Quartzitos ou metaquartzitos	1,0	Muito Baixa
Ígneas	Riólito, Granito, Dacito	1,1	
Ígneas Intrusivas	Granodiorito, Granulitos	1,2	
Metamórficas	Migmatitos, Gnaisses	1,3	
Ígneas Intrusivas	Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito	1,4	Baixa
Ígneas	Andesito, Diorito, Basalto	1,5	
Ígneas Intrusivas	Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6	
Metamórficas	Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita-xisto, Clorita xisto	1,7	
Ígneas e Metamórficas	Piroxenito, anfibolito Kimberlito, Dunito	1,8	Média
Ígneas	Homblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9	
Metamórficas	Estaurolita xisto, Xistos granatíferos	2,0	
Metamórficas	Filito, Metassiltito	2,1	
Metamórficas	Ardósia, Metargilito	2,2	
Metamórficas	Mármore	2,3	Alta
Sedimentares	Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4	
Sedimentares	Conglomerados, Subgrauvacas	2,5	
Sedimentares	Grauvacas, Arcózios	2,6	
Sedimentares	Siltitos, Argilitos	2,7	Muito Alta
Sedimentares	Folhelhos	2,8	
Sedimentares	Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9	
Sedimentares	Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc.	3,0	

QUADRO 4 – LITOLOGIA ASSOCIADA AO GRAU DE FRAGILIDADE
FONTE: Adaptado de Spörl, 2007.

2.4.5 Cobertura Vegetal e Uso do Solo

A vegetação exerce papel importante na preservação dos ambientes naturais à medida que uma grande parte de água dos eventos chuvosos fica retida nas copas e folhas das árvores, evitando que a água caia diretamente no solo, possibilitando uma infiltração mais lenta nas camadas subsuperficiais, reduzindo o risco do

escoamento concentrado na superfície (SALA, 2005). A ausência de vegetação favorece a erosão, porém mesmo em solos com vegetação preservada pode ocorrer erosão, só que em menor proporção.

O desmatamento contribui para anular o efeito estabilizador da floresta, aumentando as possibilidades de elevação temporária do lençol freático e a consequente saturação hídrica do subsolo, com efeito de promover movimentos de massa (BIGARELLA; MAZUCHOWSKI, 1985). Pereira & Almeida (2003) citam que sobre solos desnudos, pastagens ou lavouras, o aquecimento da atmosfera é bem maior do que sobre áreas onde há cobertura floresta densa. Esse aquecimento pode fazer com que haja maior ascensão de ar sobre essas áreas interferindo acentuadamente na cobertura vegetal e desestruturando a camada superficial do solo. Áreas desmatadas são favoráveis à erosão e a perda da camada superficial do solo podendo se tornar estéreis.

Uso e ocupação da terra é um tema básico para planejamento ambiental, porque retrata as atividades humanas que podem significar pressão e impacto sobre os elementos naturais (SANTOS, 2004). O conhecimento das formas de uso da terra e seu monitoramento e o registro das informações permitem a avaliação dos impactos produzidos, trazendo informações básicas para o manejo dos recursos naturais (SPÖRL, 2007).

Através do mapeamento do uso do solo de determinada área utilizando imagens de satélite é possível adquirir informações sobre a situação atual de ocupação desse local, pois a interpretação das imagens através de elementos como tonalidade, cor, textura, localização, tamanho, forma, permitiram o agrupamento de elementos semelhantes (JESSEN, 2009).

Informações sobre o tipo de cobertura vegetal são fundamentais para subsidiar o planejamento ambiental podendo ser utilizadas como suporte qualitativo à análise de fragilidade ambiental. De acordo com Ross (2003), os graus de proteção aos solos pela cobertura natural e cultivada, organizados por Ross (1994), obedecem às ordens decrescentes da capacidade de proteção (Quadro 5).

Fragilidade Ambiental	GRAUS DE PROTEÇÃO	TIPOS DE COBERTURA VEGETAL
Muito Baixa	1 – Muito Alta	Floresta/ Matas naturais, Florestas com biodiversidade.
Baixa	2 – Alta	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso. Formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa. Pastagem cultivadas sem pisoteio de gado. Cultivo de ciclo longo como o cacau
Media	3 – Média	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/ terraceamento como café, laranja com forrageiras entre ruas. Pastagem com baixo pisoteio. Silvicultura de eucaliptos com sob-bosques de nativas
Alta	4 – Baixa	Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimentado-reino, laranja) com solo exposto entre as ruas, culturas de ciclo curto (arroz, feijão, trigo, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento
Muito Alta	5 – Muito Baixa a Nula	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas, áreas alagadas e corpos de água superficiais.

QUADRO 5 – GRAUS DE PROTEÇÃO POR TIPOS DE COBERTURA VEGETAL
FONTE: Ross, 2003.

Para este trabalho foram definidas as categorias: mata, reflorestamento, solo exposto, agricultura, pastagem.

2.4.6 Áreas de Preservação

A definição dos critérios para o desenvolvimento do sistema de diagnóstico de índices de fragilidade deverá ser calçado sobre as normas legais relativas à Legislação Ambiental, pois a Política Nacional do Meio Ambiente é um instrumento essencial para o licenciamento ambiental de qualquer atividade.

Através da Resolução N°. 303, de 20 de março de 2002, são definidas áreas de preservação permanente dentro do território nacional e outros espaços territoriais especialmente protegidos, sendo estes instrumentos de relevante interesse ambiental, os quais integram o desenvolvimento sustentável, objetivo das presentes

e futuras gerações. Nesta, Área de Preservação Permanente é a área situada na faixa marginal a corpos de água (Quadro 6):

FAIXA MARGINAL	LARGURA OU LOCALIZAÇÃO	LARGURA MÍNIMA DA RPPN
Curso d'água	Menos de 10 metros	30 metros
Curso d'água	10 a 50 metros	50 metros
Curso d'água	50 a 200 metros	100 metros
Curso d'água	200 a 600 metros	200 metros
Curso d'água	Acima de 600 metros	500 metros
Nascente ou olho d'água	-	Mínimo de 50 metros
Lagos e lagoas naturais	Rural / propriedades menores que 20 hectares	100 metros
Lagos e lagoas naturais	Rural / propriedades maiores que 20 hectares	50 metros

QUADRO 6 – ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE EM FAIXA MARGINAL, MEDIDA A PARTIR DO NÍVEL MAIS ALTO, EM PROJEÇÃO HORIZONTAL, COM LARGURA MÍNIMA COM RELAÇÃO AO CURSO DE ÁGUA.

FONTÊ: Adaptado da resolução n. 303, de 20 de março de 2002.

Os outros espaços territoriais especialmente protegidos são áreas de grande interesse ambiental que possuem fauna e flora com características bastante variáveis. Estes espaços também são definidos na Resolução N°. 303 e podem ser observados no Quadro 7.

FAIXA MARGINAL	LARGURA MÍNIMA DA RPPN
Vereda	50 metros
Topo de morros e montanhas	A partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura mínima da elevação em relação a base.
Linhas de cumeada	Área delimitada a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura, em relação à base, do pico mais baixo da cumeada, fixando-se a curva de nível para cada segmento da linha de cumeada equivalente a mil metros.
Encosta ou parte desta	Declividade superior a cem por cento ou quarenta e cinco graus na linha de maior declive.
Escarpas e nas bordas dos tabuleiros e chapadas	A partir da linha de ruptura em faixa nunca inferior a cem metros em projeção horizontal no sentido do reverso da escarpa.
Restingas	Faixa mínima de trezentos metros, medidos a partir da linha de preamar máxima.
Manguezal	Em toda a sua extensão.
Dunas	Toda a área.
Altitude superior a mil e oitocentos metros	Toda a área
Locais de refúgio ou reprodução de aves migratórias	Toda a área
Nas praias, em locais de nidificação e reprodução da fauna silvestre.	Toda a área
Nos locais de refúgio ou reprodução de exemplares da fauna ameaçadas de extinção, que constem de lista elaborada pelo Poder Público Federal, Estadual ou Municipal.	Toda a área

QUADRO 7 – ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE.

FONTE: Adaptado da resolução n. 303, de 20 de março de 2002.

2.4.7 Ocupação Humana

A classificação em ocupação humana é definida por qualquer tipo de intervenção humana na área, como: construção de edificações, estradas, corpos de água artificiais. Ações antrópicas geram alterações socioambientais, que se acentuam ao longo dos anos no ecossistema, elas geram degradações do meio ambiente devido à produção de esgoto e lixo, e alterações no ambiente que resultam em poluição do solo, água e ar.

2.5 SISTEMA ESPECIALISTA

Uma das intenções deste trabalho foi propor o desenvolvimento da base para um sistema especialista capaz de ajudar os profissionais na análise dos dados espaciais. Para isto, a seguir, são apresentados os principais conceitos destes sistemas.

Os sistemas especialistas (SE) diferem dos sistemas convencionais por resolverem problemas de uma maneira muito semelhante a um especialista humano. Os SE utilizam, segundo Cardoso et. al (2004), a perícia humana num domínio particular de forma a executar funções semelhantes às de um especialista, e este conhecimento é representado por algum formalismo para representação do conhecimento.

Todos os SEs são Sistemas Baseados em Conhecimento (SBC) como pode ser observado na Figura 1. Os SBC são programas de computador que usam o conhecimento representado explicitamente para resolver problemas. Eles manipulam conhecimento e informação de forma inteligente e são desenvolvidos para serem usados em problemas que requerem uma quantidade considerável de conhecimento humano e de especialização (REZENDE, 2005). Um SE deve, além de inferir decisões, ter capacidade de adquirir novos conhecimentos e, desse modo, melhorar o seu desempenho de raciocínio (PIO, 2010). Ou seja, para que um sistema especialista seja eficiente é necessário que seja fácil interagir com ele, que seja possível inserir novas informações ou regras e modificar as antigas, aumentá-las e/ou alterá-las. As bases do conhecimento de um sistema especialista contêm fatos (dados) ou regras (fatos condicionais) ou outra representação que usa tais fatos como base para a tomada de decisões (SCHWABE E CARVALHO, 1987).

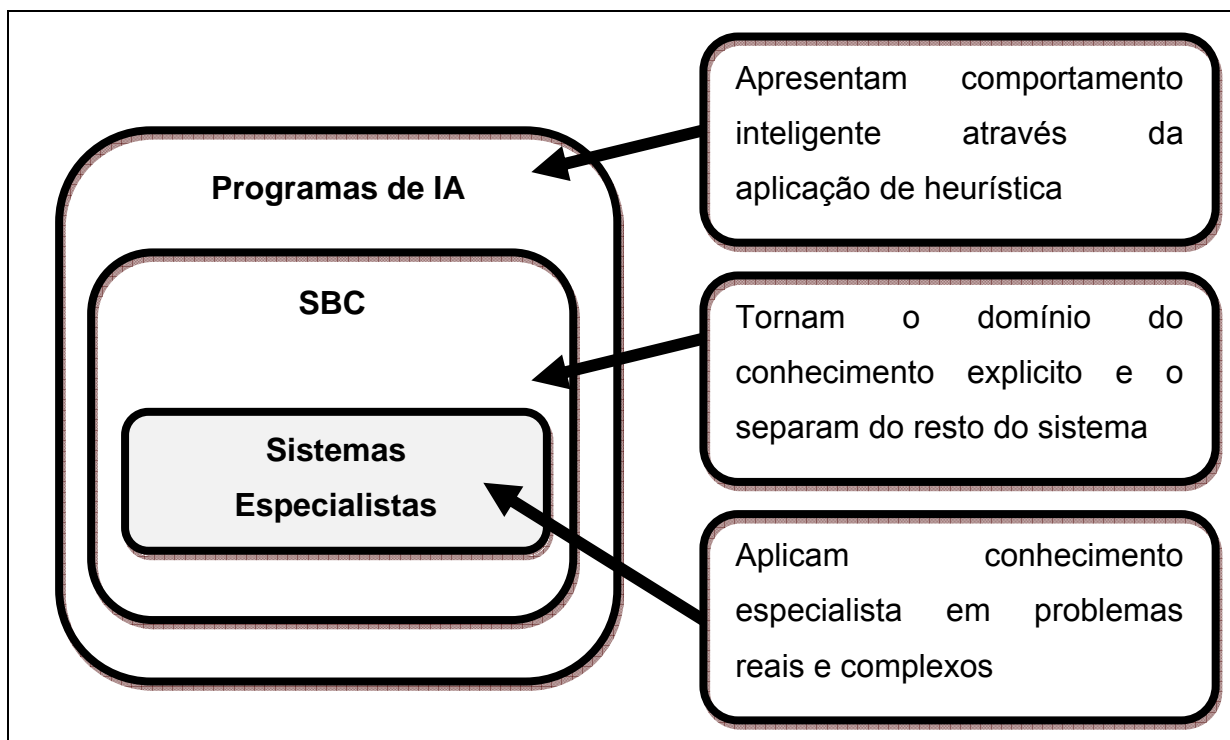


FIGURA 1 – DEFINIÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS.
FONTE: Adaptado de Waterman (1986).

Quando se opta por desenvolver esses sistemas é necessário que se escolha trabalhar com domínios que contenham uma quantidade administrável de informações, que permitam ser moldadas. É essencial que as pessoas sejam capazes de interagir com ele facilmente, para isso é fundamental o sistema explicar seu raciocínio, pois as pessoas que o utilizarem só aceitam realmente seus resultados se estiverem convencidas da precisão do processo de raciocínio que produziu tais resultados. Outra questão é o sistema ser capaz de adquirir novos conhecimentos, pois, segundo Rich e Knight (1993), os sistemas especialistas derivam da riqueza das bases de conhecimento que eles exploram, e é extremamente importante que essas bases sejam as mais completas e precisas possíveis. Os Sistemas Especialistas devem aplicar heurísticas⁴, assim como o especialista, para guiar o raciocínio e assim reduzir as áreas de busca de uma solução (NEGNEVITSKY, 2005).

⁴ Heurísticas são regras práticas apreendidas ou descobertas por especialistas de um dado domínio (SCHWABE E CARVALHO, 1987).

Segundo Schwabe e Carvalho (1987), o conhecimento dos sistemas é explícito e organizado de forma a simplificar o processo de decisão, e todos os sistemas especialistas possuem características comuns às quais são:

1. Resolvem problemas muito complexos tão bem quanto, ou melhor, que especialistas humanos;
2. Raciocinam heurísticamente, usando o que os peritos consideram efetivamente regras práticas;
3. Interação com usuários humanos utilizando inclusive linguagem natural;
4. Manipulam e raciocinam sobre descrições simbólicas;
5. Funcionam com dados incompletos ou incertos e regras incertas de julgamento;
6. Contemplam hipóteses múltiplas simultaneamente;
7. Explicam porque estão fazendo determinada pergunta; e
8. Justificam suas conclusões.

Um sistema especialista atual, conforme mostrado na Figura 2, apresenta, em geral, uma arquitetura com três módulos: uma base de regras, uma memória de trabalho e um motor de inferência. A base de regras e a memória de trabalho formam a base do conhecimento (BC), esta reúne o conhecimento do especialista modelado conforme a representação do conhecimento escolhida para modelar o domínio em questão (PY, 2002). O Motor de inferência é projetado de forma a funcionar como um solucionador genérico de problemas, ou seja, é o componente do sistema especialista destinado ao “raciocínio” (SOUTO, 2005).

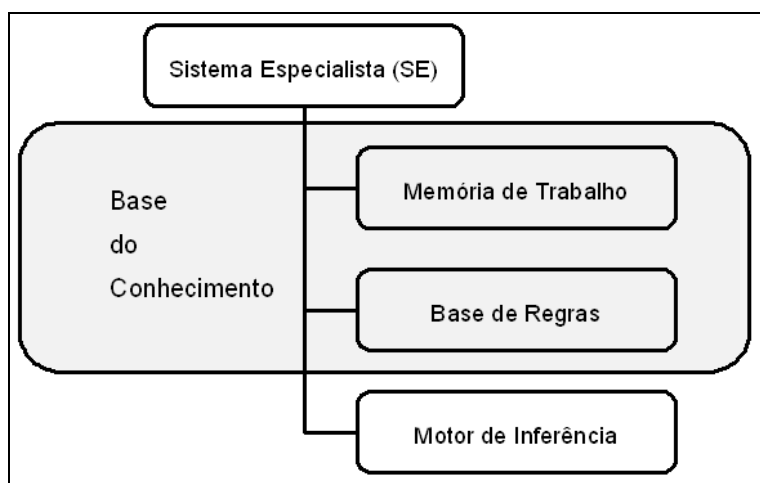


FIGURA 2 – ARQUITETURA DE UM SE.
FONTE: Adaptado de Bittencourt (2001).

2.5.1 Aquisição do Conhecimento

A aquisição do conhecimento é o principal elemento para o desenvolvimento de um sistema especialista, o processo de extração do conhecimento é a parte mais trabalhosa e custosa na questão de tempo. Segundo Prado (2004), a aquisição do conhecimento desses sistemas se refere à experiência do especialista, bem como, a forma de raciocínio que ele usa para resolver os problemas.

O SE deve ser capaz de absorver o conhecimento do especialista sem suas limitações físicas, pois quanto mais problemas analisar, maior será a experiência adquirida e, portanto a qualidade e confiabilidade das respostas serão cada vez melhores.

2.5.2 Motor de Inferência

De acordo com Couto (2005), o objetivo de um procedimento de inferência é descobrir um caminho através de um espaço de solução do problema, a partir de um fato (uma conclusão) até uma evidência ou vice-versa. Existem basicamente dois modos de raciocínio aplicáveis à regra de produção: encadeamento progressivo ou encadeamento para frente (do inglês, “forward chaining”), e encadeamento regressivo ou encadeamento para trás (do inglês, “backward chaining”) (BITTENCOURT, 2001).

No encadeamento para frente o raciocínio começa a partir de dados conhecidos e prossegue a busca de uma solução a partir desses dados. Nessa técnica uma regra inicial é sempre executada, então, o sistema adiciona um novo fato à base de dados e o ciclo termina quando não há mais regras admitidas (NEGNEVITSKY, 2005).

No encadeamento para trás, o sistema especialista começa o processo de inferência com uma solução hipotética e realiza a busca de uma evidência na Base de Regras para provar isso, ou seja, a meta orienta o raciocínio, o comportamento do sistema é controlado por uma lista de objetivos. Um objetivo pode ser satisfeito diretamente por um elemento da memória de trabalho, ou podem existir regras que permitam inferir algum dos objetivos correntes, isto é, que contenham uma descrição deste objetivo de forma direta (PY, 2002).

Uma vez definido o tipo de encadeamento, o motor de inferência necessita ainda de uma estratégia de busca para guiar a pesquisa na memória de trabalho e na base de regras (ARAKI, 2005), o que é conhecido por busca em espaço de estado.

2.5.3 Exemplos de Sistemas Especialistas

O primeiro protótipo de sistema especialista foi o programa DENDRAL, desenvolvido em 1960, na Universidade Stanford (RUTKOWSKI, 2008), para a área de química orgânica. De acordo com Py (2002) o objetivo do projeto foi desenvolver programas capazes de determinar automaticamente o conjunto de estruturas moleculares, constituídas de átomos conhecidos, capazes de explicar dados provenientes da análise espectrográfica de uma molécula desconhecida.

Na Universidade de Stanford em 1970, dois outros sistemas especialistas foram criados o MYCIN e o PROSPECTOR (RUTKOWSKI, 2008). O MYCIN foi projetado para a área médica para ser capaz de auxiliar médicos no diagnóstico de doenças infecciosas, este tenta recomendar terapias apropriadas para pacientes de infecções bacteriológicas, executando uma tarefa normalmente desenvolvida por um especialista humano. Segundo Rich & Knight (1993), o MYCIN representa a maioria de seus conhecimentos de diagnóstico na forma de um conjunto de regras. E o sistema PROSPECTOR, desenvolvido para a área de prospecção mineral, com o objetivo de apoiar geólogos na definição de tipos de rochas utilizando como base os diferentes tipos de minerais. Esse sistema foi associado a várias pesquisas de definição de depósitos minerais e estimativas de volumes desses depósitos. Maiores informações sobre o funcionamento desses sistemas podem ser encontrados em Shortliffe, 1976; Feigenbaum; Buchanan; Lederberg, 1971.

A partir dessa época, vários sistemas foram desenvolvidos e resolveram diversos problemas, em diferentes domínios, como por exemplo, agricultura, química, sistemas de computadores, eletrônica, engenharia, geologia, gerenciamento de informações, direito, matemática, medicina, aplicações militares, física, controle de processos e tecnologia espacial (PY, 2002). De acordo com Negnevitsky (2005), um estudo realizado por Waterman, em 1986, referiu-se a um

número notável de sistemas especialistas bem sucedidos, aproximadamente 200, porém a maioria das aplicações era na área de diagnóstico médico. No entanto, este ainda relata que estudos realizados por Durkin, em 1994, mostravam que o número de sistemas especialistas desenvolvidos sete anos depois já eram aproximadamente 2500 e mais de 60% desses eram da área de negócios e produção. Posteriormente desenvolveu-se sistemas especialistas nas mais diversas áreas, como, por exemplo, Fernandes et al. (2002) desenvolveram uma metodologia de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) das atividades agropecuárias sobre o solo, utilizando técnicas de Sistema de Informações Geográficas (SIG), Sistemas Especialistas (SE) e modelagem matemática de forma integrada. Em 2006, Giboshi et al., desenvolveram um sistema de apoio à decisão para a recomendação de uso e manejo da terra, integrando Sistema Especialista a Sistema de Informações Geográficas.

2.5.4 Shells de Sistemas Especialistas

Devido ao fato de os sistemas serem construídos como um conjunto de representações declarativas (em sua maioria, regras) combinadas com um interpretador dessas representações declarativas, é possível separar o interpretador do conhecimento específico do domínio da aplicação e assim criar um sistema que podia ser usado para elaborar novos sistemas especialistas através da adição de novos conhecimentos, correspondentes ao novo domínio do problema (RICH E KNIGHT, 1993). Esses interpretadores são chamados de shells, que servem de base para os sistemas especialistas e reduzem drasticamente o seu tempo de desenvolvimento.

Segundo Rutkowski (2005), os shells são programas de computador concebidos com uma máquina de inferência e uma base de conhecimento vazia. De acordo com Rezende (2005), oferecem um esquema de representação do conhecimento e motor de inferência, nos quais a interface e a estratégia para resolução de programas são prefixadas. Alguns exemplos de shells para sistemas especialistas são:

1. EMYCIN, o qual foi desenvolvido na Universidade de Stanford, contendo todas as características do MYCIN, exceto o conhecimento das doenças infecciosas no sangue. Este facilitou o desenvolvimento de uma variedade

de aplicações de diagnóstico, para os quais os desenvolvedores do sistema somente precisavam acrescentar novos conhecimentos na forma de regras visando obter uma nova aplicação (NEGNEVITSKY, 2005).

2. TMYCIN foi modelado a partir do EMYCIN, porém é uma versão mais simplificada (NOVAK JR, 2010).
3. *Elements Environment* é um pacote de ferramentas para desenvolvimento de sistemas especialistas, baseados em regras de negócios, fabricado pela empresa americana Blaze Software (REZENDE, 2005).
4. Level5 Object foi desenvolvido para sistemas especialistas baseados em regras com linguagem de programação orientada a objeto, um exemplo de uso pode ser encontrado em Negnevitsky, 2005.
5. CLIPS é um programa de domínio público que utiliza linguagem de programação orientada a objeto associado a regras, desenvolvido pela Johnson Space Center da NASA.
6. JESS foi desenvolvido por Ernest Friedman-Hill nos laboratórios da Sandia National Laboratories, em Livermore na Califórnia, baseado na linguagem Java da Sun Microsystems.

2.6 ÁRVORE DE DECISÃO

Árvore de decisão é um método que leva utiliza amostras de treinamento para aprender a gerar regras de decisão, e que permitem classificar novos dados; e de acordo com Crepaldi et al (2006), são as únicas a apresentar os resultados hierarquicamente (com priorização). Segundo Luz (2011), é uma função que mapeia cada elemento de seu domínio em um elemento da amplitude de resultados possíveis, que é tipicamente um rótulo de classe ou um valor numérico. Esse método utiliza uma estrutura em forma de árvore, expresso como um grupo de regras com IF-THEN, que é composto de um nó de raiz (representa uma decisão ou o atributo mais importante), e uma série de nós internos (alguns resultados possíveis) e nós de folhas (soluções que serão classes ou valores numéricos) (Figura 3). As regras de decisão podem ser entendidas, usadas e modificadas de forma mais concisa e são fáceis de combinar com sistemas especialistas. Pois,

segundo Ye (2003), é um método de aprendizado supervisionado que permite a extração de conhecimento a partir de dados de entrada, na forma de amostras de treinamento.

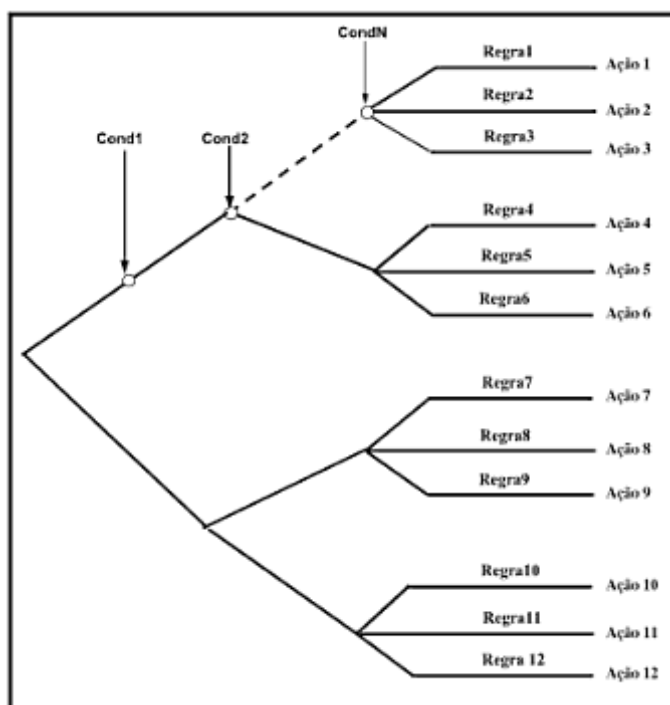


FIGURA 3 – EXEMPLO DE ÁRVORE DE DECISÃO.
FONTE: Leite (2006)

A árvore de decisão permite uma tomada de decisão levando em consideração os atributos considerados mais relevantes, para isso ela decompõem um problema em sub-problemas mais simples, e segundo Crepaldi et al (2006), recursivamente utiliza a mesma estratégia aplicada a cada subproblema. Essa estratégia é denominada de dividir para conquistar, na qual a árvore de decisão tem a função de particionar recursivamente um conjunto de treinamento, até que cada subconjunto obtido deste particionamento contenha casos de uma única classe. O objetivo desse processo é analisar e confrontar a distribuição de classes durante a classificação que compõem a construção da árvore.

Quando se trabalha com grandes conjuntos de dados é comum dividir os dados em subconjuntos e depois converter uma árvore de decisão num conjunto de regras correspondentes, um exemplo simples, citado por Luger (2002), que permite entender melhor o processo pode ser observado na Figura 4, no qual a árvore de decisão é utilizada para análise de crédito.

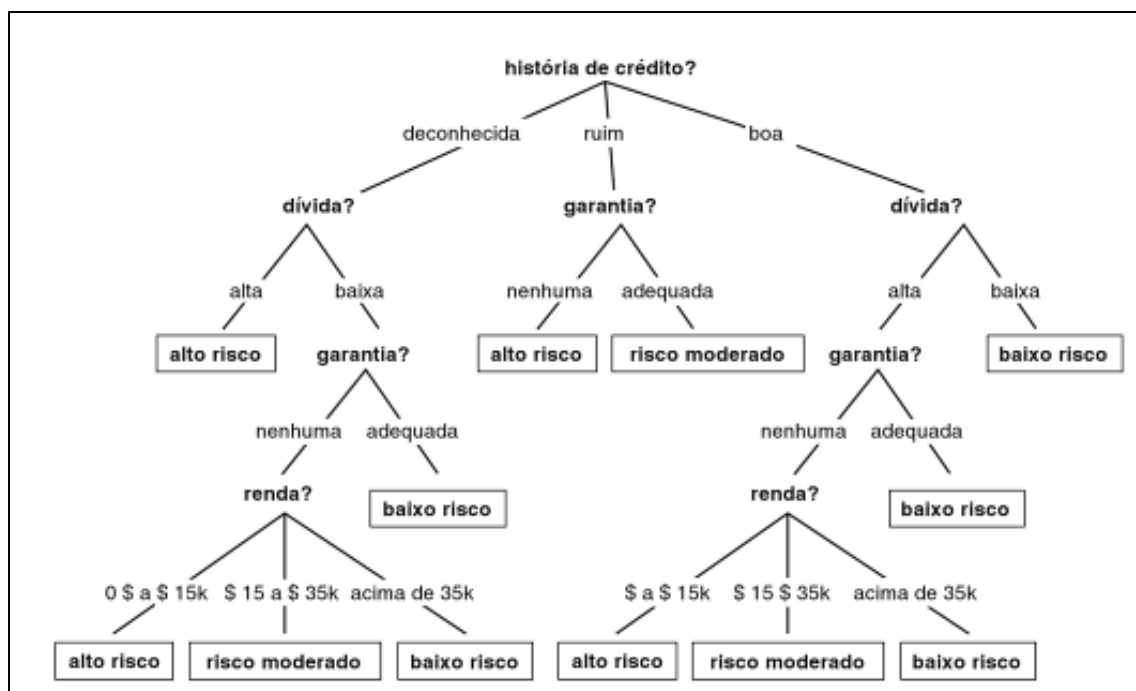


FIGURA 4 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE ÁRVORE DE DECISÃO.
FONTE: Luger (2002)

Os sistemas especialistas têm sido desenvolvidos para automatizar a construção de mapas de acordo com os princípios do projeto cartográfico, como na pesquisa desenvolvida por Schmidt (2008), que trata as questões de linguagem cartográfica no Atlas Social do Paraná. Esse desenvolveu um sistema especialista que permite, que usuários não cartógrafos, produzam mapas temáticos, que atendem ao conhecimento técnico-científico para definição de simbologia em cartografia temática. Em 2005, Araki, publicou sua pesquisa na qual desenvolveu um SE baseado em regras para integrar dados oriundos de imagens de satélite de alta resolução e dados medidos com sistemas de laser scanner. Seu trabalho trata do aspecto da ortorretificação de imagens de satélite de alta resolução, da possibilidade de compensar informações faltantes numa das fontes, possibilitando a classificação da cobertura do terreno de forma mais eficiente, diminuindo as áreas de oclusão no terreno.

E alguns exemplos de sistemas especialistas, ao nível internacional, já desenvolvidos, visando à determinação de áreas com riscos de sofrer erosão são:

1. O ImpelERO desenvolvido na *Universidad de Sevilla*, o projeto foi financiado pela IMPEL DGXII da Comissão Europeia, no âmbito do Programa Ambiente e Clima, entre 1994-1998, é um sistema especialista que utiliza árvore de decisão e redes neurais artificiais para relacionar a vulnerabilidade à erosão do solo a fatores biofísicos e práticas de manejo agrícola. Esse SE é uma ferramenta útil para a concepção e implementação de sistemas agrícolas sustentáveis no âmbito da agricultura de precisão. Maiores informações podem ser encontradas em Rosaa et. al, 1999.
2. A *Universiti Kebangsaan Malaysia*, na Malásia, vem desenvolvendo um protótipo de Sistema Especialista para minimizar a erosão do solo em áreas de construção. Este protótipo tem o objetivo de recomendar as melhores práticas de gestão e medidas de mitigação para minimizar a erosão do solo e sedimentação durante as atividades de construção. (OOSHAKSARAIE et al, 2009)
3. O SLEMS desenvolvido pela *University of New Brunswick* é um protótipo de um sistema baseado em conhecimento para estimativa de perda de solo, que considera o impacto negativo da erosão sobre o meio ambiente. Este protótipo utiliza aplicação de sensoriamento remoto e informações geográficas na estimativa de perdas de solo e modelagem de problemas (MTALO & DERENYI, 1993).

2.7 QUALIDADE DOS DADOS ESPACIAIS

Quando se trabalha com dados espaciais é imprescindível avaliar a qualidade do conjunto de dados, se esses são adequados para determinada aplicação e qual a qualidade que se pode esperar das análises efetuadas com eles, ou seja, o quão confiáveis eles são. Porém, é essencial entender, que a qualidade depende da necessidade de cada usuário, pois um dado que é impreciso para uma determinada aplicação, pode ser um dado que possui qualidade suficiente para atender as necessidades de outro usuário. Segundo Jones (1997), a qualidade de um conjunto de dados depende, por conseguinte, do que o utilizador tem a intenção de fazer com

os dados, pois a qualidade dos dados está associada a uma variedade de conceitos inter-relacionados (por exemplo, acurácia, o erro de precisão e resolução) que podem ser definidas de forma a ajudar a quantificar a qualidade dos dados.

Quando se trabalha com dados para análises ambientais, a utilização de dados de diversas fontes é extremamente comum, e é essencial que se esteja ciente que existem limitações para seu uso. Segundo Ervideira (2010), as limitações são consequências de dados de diferentes formatos, de origens diferentes, com níveis de exatidão posicional e temática diferentes, provenientes de escalas diferentes, tudo isto integrado. De acordo com Devillers et al (2005), de uma maneira geral os usuários, tanto especialista quanto não especialista, não possuem as informações necessárias sobre as características de qualidade dos dados espaciais que utilizam. E este mesmo autor ainda destaca que quando se fala em qualidade, pode-se falar da qualidade quanto às características intrínsecas dos dados correlacionadas, por exemplo, a tecnologia de aquisição; e também a qualidade extrínseca relacionada à adequação do uso, se as características dos dados atendem as necessidades do usuário.

Dentro do contexto, nesta pesquisa, se trata das principais questões envolvidas em qualidade de dados para análises ambientais que são: escala, acuracidade posicional e semântica. Esses aspectos da qualidade dos dados permite-nos ter o conhecimento das limitações técnicas, que resultam numa noção melhor da adequabilidade dos dados utilizados, numa tomada de decisões apurada e melhor informada, numa transferência de informações mais robustas (WEBER, 1999). A qualidade dos dados não depende apenas da sua exatidão, mas acima disso do conhecimento da codificação de seus atributos, de quando e como estes foram adquiridos (JONES, 1997). Assim certifica-se de que através de dados de qualidade pode-se obter informações de qualidade adequadas ao uso, pois quanto mais informações disponíveis sobre os dados originais mais facilmente pode-se avaliar sua adequabilidade para seu propósito.

Quando se trabalha com dados espaciais, com qualquer tipo de estudo que necessite delimitar o espaço físico ou detalhá-lo, qualquer mudança de escala, acabará resultando em perda ou ganho de informação. Segundo Jones (1997), pode-se observar que o conhecimento da escala de um mapa é um parâmetro

importante na ausência de outros dados sobre a precisão, pois essa informação implica na melhor precisão que o dado poderia ter.

Em relação à multiescalaridade, deve-se verificar o nível de alteração que cada base de informação deve sofrer para a criação de uma base única, compatível com todas as informações analisadas. A integração das informações em diferentes escalas sob essa base única fatalmente ocasionará erros e perdas de informações em diferentes níveis. Um correto conhecimento dos erros e sua significância relativa (entre as informações) e absoluta (ao mundo real) são indispensáveis para a consistência da informação.

Em princípio o problema da integração de múltiplas escalas em uma única base de informações é um dos mais sérios quando se trata de informações ambientais ou geoecológicas. Processos geoecológicos operam simultaneamente em diferentes escalas operacionais, que por sua vez irão influenciar, na montagem do processo de inter-relacionamento, na localização, padrão e na própria escala operacional do conjunto. (MENEZES & COELHO NETO, 1999).

A acurácia posicional pode ser definida como um parâmetro de qualidade indicador do afastamento esperado de um objeto em relação à sua posição real no terreno (ARONOFF, 1995). No contexto de dados geográficos, a precisão pode ser considerada como a diferença entre um valor gravado (ou medição ou observação) e o valor verdadeiro (JONES, 1997). Segundo Lazzarotto (2005), o desconhecimento da acuracidade posicional das feições mapeadas, também pode induzir a erros, trazendo prejuízos na eficácia de utilização da base cartográfica e até mesmo inviabilizando processos de atualização ou de mapeamento de áreas contíguas às já mapeadas.

De acordo com Jones (1997), de um modo geral, a avaliação da exatidão de uma observação individual ou medição só pode ser feita por comparação com a medição mais precisa ou classificação mais comumente aceita que seria possível de se obter. O mesmo autor ainda ressalta, que a questão da qualidade dos dados, preocupa-se com a real probabilidade de haver discrepâncias entre a informação que está registrada nos dados e a realidade.

A semântica estabelece o significado do fenômeno. Segundo Deviller & Jeansoulin (2006), o conceito de consistência semântica expressa a qualidade com que os objetos geográficos são descritos, de acordo com o modelo selecionado, ou seja, a relevância do significado dos objetos geográfico mais do que a sua

representação. A relevância semântica é de grande importância na determinação da sua aptidão ao uso, pois expressa a pertinência do significado do objeto geográfico correlacionando-a com os significados das coisas no universo do discurso (realidade).

As propriedades semânticas permitem que identifique-se o fenômeno, enquanto as propriedades espaciais permitem-nos posicionar o fenômeno no mundo real e também conhecer sua geometria e suas relações espaciais com outros fenômenos (VIEIRA et al, 2002)

3. METODOLOGIA

A fragilidade dos ambientes naturais continuamente sofre modificações, pois os padrões de uso da terra se alteram sempre. Áreas que hoje são estáveis, amanhã podem se tornar instáveis, ter seu equilíbrio rompido por eventos naturais ou pela ação humana e, em consequência, essas podem ter aumento da tendência de processos erosivos e também gerar danos a bacia hidrográfica e regiões adjacentes.

Todos os processos que acontecem em determinado meio estão interligados. Por exemplo, a mata ciliar, aquela que fica nas margens dos rios, serve de berçário para várias espécies e também protege contra as enchentes e erosão, além de servir de alimento para muitos peixes e outros animais. Se essa mata sofrer degradação, imediatamente todo o restante do ecossistema será afetado, tanto os componentes abióticos (sem vida), como, por exemplo, minerais, compostos orgânicos e clima, como também os componentes bióticos (seres vivos).

Dentro deste contexto, na modelagem, que desenvolvida nessa tese, cada informação é recebida com um determinado peso, dependendo do nível de influência sobre a região. Isso permite determinar os riscos ambientais, as áreas de preservação; podendo qualificá-los e quantificá-los com bases em conhecimentos de várias áreas: das Ciências Geodésicas, da Geografia, da Geologia, da Hidrologia, da Ecologia, e áreas afins.

Neste capítulo apresenta-se a metodologia empregada no presente trabalho de pesquisa. São explicitados quais os critérios que serão utilizados para a avaliação da fragilidade ambiental, bem como, a importância de cada um deles. Na seção 3.1 é descrita a unidade de estudo para avaliação do índice de fragilidade ambiental. Na seção 3.2 descreve-se a origem dos dados utilizados. Na seção 3.3, são apresentados quais as estruturas, escalas e resoluções dos dados, na seção 3.4 são descritos os critérios de classificação dos índices de fragilidade ambiental e a definição das classes. Na seção 3.5 discute-se o a ponderação para os parâmetros do modelo. Na seção 3.6 expõem-se a metodologia para avaliação e verificação consistência da modelagem. A seção 3.7 critérios definidores do sistema especialista IFA, na seção 3.8 apresenta-se a metodologia do sistema especialista.

3.1 UNIDADE DE MEDIDA

Nesta seção é discutido qual o tamanho da unidade de estudo para a ponderação dos critérios de definição das áreas de fragilidade ambiental. Para o processo de definição da escala inicialmente utilizou-se, para a unidade de medida, analogias com processos de determinação de áreas de conservação ambiental. Levou-se em consideração que ambos envolvem a avaliação da contribuição que os ecossistemas naturais representam para o bem-estar humano. Sendo esta uma tarefa complexa que envolve fatores sociais e políticos. E da qual não é fácil definir quais são as ameaças a determinado meio, pois segundo Morsello (2001), de certa forma, ameaça é um conceito antropocêntrico, pois se refere à preocupação humana com a alteração de determinadas características consideradas como valiosas ao ambiente. Essas podem ter causa nas atividades humanas ou então nas perturbações naturais, como secas ou enchentes.

Para as Unidades de Conservação, a definição e a percepção do que é o “valor para a conservação”⁵ são variáveis e, além disso, muitas vezes esses valores são contaminados por outras percepções, como a beleza e o estado selvagem (MORSELLO, 2001). Essa é a mesma dificuldade que existe para definir os critérios para determinação dos níveis de fragilidade ambiental. A seleção dos critérios não é fácil, devido à dificuldade de saber onde iniciar ou encerrar a discussão sobre os princípios ecológicos e ambientais, pois dependendo da situação qualquer área do conhecimento pode ser importante.

É essencial compreender os fatores que causam as mudanças no meio ambiente, para projetar intervenções que garantam impactos positivos e minimizem os que são negativos. E também é fundamental que a escolha da escala espacial ou temporal seja adequada para avaliação do processo de fragilidade ambiental, para que esta seja consistente para servir de subsídio para a gestão e planejamento da região, ou seja, gerar resultados que auxiliem na escolha de estratégias, intervenções e oportunidades relacionadas às áreas de interesse.

⁵ O termo unidade de conservação é tratado como se referindo a uma porção de terra em que, na prática, têm sido adotadas medidas restritivas de uso do solo, mesmo que essa área não tenha sido legalmente instituída (Morsello, 2001).

Diversos autores, de várias ciências, têm utilizado bacias hidrográficas como unidades de estudo de alterações nos padrões naturais de áreas, por exemplo, segundo Resck (1992), as bacias hidrográficas assumem importante papel no planejamento e gestão ambientais, uma vez que representa a unidade de produção agro-silvo-pastoril mais racional de se trabalhar, porque todos os fatores que afetam a produção e o equilíbrio ambiental refletem sobre suas características físicas, bióticas e até mesmo antrópicas.

Da mesma forma Guerra et al. (1999), cita que muitos pesquisadores chamam atenção para a bacia hidrográfica como unidade natural de análise da superfície terrestre, na qual é possível reconhecer e estudar as inter-relações existentes entre os diversos elementos da paisagem e os processos que atuam na sua esculturação. Uma bacia hidrográfica deve reportar ou expressar as suas condições ambientais, sendo descrita como um conjunto de componentes físicos, químicos e biológicos e também em muitas ocasiões, como uma unidade sócio-político-econômica para planejamento e ordenação dos recursos naturais (FAO, 1992).

Segundo Kobiyama et al. (2008), a bacia hidrográfica é uma área geográfica, que compreende todas as nascentes de um rio principal e de seus rios afluentes, juntamente com as áreas no entorno desses rios. O mesmo autor ainda descreve que é uma região sobre a terra, na qual o escoamento superficial em qualquer ponto converge para um único ponto fixo, chamado exutório. O Ministério da Agricultura (1987) definiu micro bacia hidrográfica como uma área fisiográfica⁶ drenada por um curso de água ou por um sistema de cursos de água conectados e que convergem, direta ou indiretamente, para um leito ou para um espelho da água, constituindo uma unidade ideal para o planejamento integrado do manejo dos recursos naturais no meio ambiente por ela definido. As duas definições anteriores não possuem diferenças, desta forma, neste trabalho considera-se bacia e micro-bacia termos similares que diferem somente na extensão da área que abrangem. E esta se constitui numa célula básica de análise ambiental, onde é permitido conhecer e

⁶ A caracterização fisiográfica de uma bacia hidrográfica consiste na descrição sucinta dos fatores topográficos, geológicos, geomorfológicos e de ocupação do solo intervenientes na geração de escoamentos e na determinação de coeficientes definidores da forma, drenagem, declividade da bacia, entre outros (Barros et Al, 2004).

avaliar seus diversos componentes, processos e interações que nela ocorrem (BOTELHO; SILVA, 2004).

Nesta pesquisa a unidade fundamental utilizada para análise da fragilidade ambiental será a bacia hidrográfica, com ela se delimitará o espaço geográfico a ser analisado.

3.2 FONTE DE DADOS

Nessa seção são descritas as fontes dos dados utilizados na pesquisa para o desenvolvimento da modelagem IFA e também para os estudos preliminares. As informações utilizadas como parâmetros para a modelagem ambiental podem ser apresentadas em um conjunto de registros digitais referidos a entidades lógicas, características geométricas, de diferentes naturezas, como por exemplo: tipo, resolução e escala.

Para os estudos preliminares as características físicas da região foram obtidas de cartas digitais, na escala 1:50.000 e 1:5.000.000, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, o qual constitui o principal provedor de dados e informações do país. Para o desenvolvimento do SE e as análises correlacionadas a modelagem ambiental utilizou-se os dados disponibilizados pelo Instituto das Águas do Paraná, que é o órgão executivo gestor do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SEGRH/PR. Esse têm objetivo oferecer suporte institucional e técnico à efetivação dos instrumentos da Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH/PR), e disponibiliza informações online através da Área de Tecnologia da Informação e Geoprocessamento – ATIG para *download*. A escala e origem dos dados são apresentadas no Quadro 8.

Dado	Escala	Origem do Dado	Data	Sistema de Referência
Dados Altimétricos (curvas de nível e pontos cotados)	1:10.000	SUDERHSA, IPPUC e PARANACIDADE	2000	SAD-69
Tipo de solo	1:20.000	IBGE, EMBRAPA	-	SAD-69
Cobertura Vegetal e uso do solo	1:10.000	SUDERHSA	2000	SAD-69
Dados Climatológicos	1:5.000.000	IBGE	-	SIRGAS
Dados Geológicos	1:20.000	SUDERHSA	2000	SAD-69
Dados Hidrográficos	1:10.000	SUDERHSA	2000	SAD-69

QUADRO 8 – ESCALAS DOS DADOS UTILIZADOS NO MODELO MATEMÁTICO PARA CLASSIFICAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL.
Fonte: Autora (2013).

Todos os dados, independente do sistema de referência inicial, serão alocados no banco de dados em um sistema de referência único, WGS-84, projetados em UTM, visando que futuramente possam ser inseridos dados advindos de levantamentos por satélite.

3.3 ESTRUTURA, ESCALA E RESOLUÇÃO DE DADOS

Como os dados utilizados nessa pesquisa são oriundos de diversas fontes, eles possuem escala, resolução espacial e estruturas diferentes. O uso integrado dos dados requer que os mesmos sejam transformados e padronizados, de modo que se possam associar dados quantitativos e qualitativos gerando resultados com as menores distorções possíveis, a fim de que os produtos resultantes possam ser válidos para a tomada de decisões.

3.3.1 Estrutura de Dados

A partir de dados oriundos de sensoriamento remoto ou aero fotogramétrico é possível observar vários processos da natureza, modificações na paisagem por ações antrópicas ou naturais, pois esses permitem uma visão dinâmica e temporal da superfície terrestre. Através de sensores remotos é possível identificar e classificar várias classes de uso do solo e monitorar e prever as evoluções espaciais e temporais da superfície.

Dados oriundos da geodésia espacial, tal como, GPS são utilizados para se obter amostras da distribuição de um atributo espacial dentro de uma área de interesse.

Basicamente nesse trabalho utilizaram-se dados com estrutura vetorial e matricial para a entrada. As estruturas vetoriais são as feições do terreno ou fenômenos representados através de pontos, linhas ou polígonos associados a coordenadas geodésicas que as identificam no espaço. Esses dados, além das características de localização ainda possuem propriedades e relacionamentos topológicos (proximidades, contiguidades e ligações viárias). E os dados matriciais, os quais utilizam células (pixels), são distribuídos ordenadamente em linhas e colunas com um atributo de interesse associado ao pixel.

3.3.2 Escala e Resolução de Dados

A resolução espacial influencia diretamente a extração de informação da cobertura da terra a partir de imagens. Os valores das células representam o fenômeno retratado pelos dados raster definido como uma categoria, por exemplo, solo com baixo índice de fragilidade ambiental. O tamanho do pixel, a sua resolução espacial, determina qual o padrão e características o raster apresentará. Quanto maior o tamanho do pixel, menor detalhamento do fenômeno será representado.

"A regra é: dividir o denominador da escala do mapa por 1000 para obter o tamanho detectável em metros. E a resolução é a metade desta quantia." (TOBLER, 1987).

Qual a resolução adequada para os dados, quais as incertezas engastadas em cada tipo de dado e qual a qualidade do dado final? Para determinar a resolução apropriada para os dados utilizou-se a fórmula 3.3.2.1 de acordo com a definição de Tobler.

$$\text{Escala}_{\text{MAPA}} = \text{Resolução}_{\text{RASTER}} \times 2 \times 1000 \quad (3.3.2.1)$$

Sendo que, a resolução deve ser considerada em metros.

No Quadro 9, é mostrada a escala dos dados disponíveis e sua respectiva resolução espacial, conseqüentemente observa-se que há certo grau de incerteza associado aos dados de entrada, e esse é diferente entre os tipos de dados.

Dado	Escala	Porção Detectável no terreno (m)	Resolução Espacial
Dados Altimétricos (curvas de nível e pontos cotados)	1:10.000	10 m	-
Tipo de solo	1:20.000	20 m	10 m
Cobertura Vegetal e uso do solo	1:10.000	10 m	5 m
Dados Climatológicos	1:5.000.000	5000m	2500 m
Dados Geológicos	1:20.000	20 m	10 m
Dados Hidrográficos	1:10.000	10 m	-

QUADRO 9 – ESCALA E RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS DADOS DE ORIGEM.
Fonte: Autora (2013).

Os dados de tipo de solo são oriundos de levantamentos de diversas épocas produzidos pelo Projeto RadamBrasil ao longo das décadas de 1970 e 1980, complementados por outros estudos mais detalhados de solos produzidos principalmente pela Embrapa e pelo IBGE (IBGE, 2013). Assim como a nomenclatura e as especificações recomendadas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SBCS da Embrapa (1999).

Com isso surgem as seguintes questões, como correlacionar esses dados e como estimar as incertezas inerentes ao processo? Inicialmente se constatou se a escala de dado de entrada permitia uma interpretação clara do fenômeno mapeado e qual o tipo de distribuição de cada fenômeno, se essas informações mapeadas possuíam mudança significativa dentro das regiões analisadas, ou seja, se a informação seria consistente dentro do universo de análise.

Em função disso, determinou-se como seriam inseridas as informações tanto qualitativas como quantitativas e de suas incertezas na modelagem viabilizando a combinação dessas informações. Considerando as entrada de informações incertas, optou-se por mudar a resolução de entrada dos dados no modelo matemático, por exemplo, dados de cobertura vegetal que originalmente possuíam uma resolução espacial de 5m foram degradados para uma resolução de 10m para entrada na

modelagem existente no sistema. Já dados com resolução espacial de 2500m, clima, foram interpolados para a geração de dados com resolução espacial de 10m.

A opção pela representação de 10m é suficiente para entrada de dados na escala 1:20.000. A opção por essa resolução permite que as incertezas inerentes de cada dado de entrada sejam consideradas, até mesmo os dados climáticos, pois para isso considerou-se que o fenômeno mapeado não possui variações bruscas dentro de uma mesma região.

3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA MODELAGEM AMBIENTAL

Os fatores ambientais são parâmetros que servem para exprimir a variação da qualidade ambiental dos ecossistemas. Segundo Macedo (1995), ao estimar as oscilações de um indicador ambiental, em escala apropriada, fica estabelecida a própria medida da intensidade de um impacto ambiental, ou pelo menos se torna conhecido um valor resultante, com consistência e aptidão suficientes para representá-la em um estudo analítico-comparativo.

Nesta pesquisa para o desenvolvimento do modelo matemático utilizou-se os critérios: declividade do terreno, solos, rochas, clima, ocupação humana, cobertura vegetal, APP e uso do solo para descrever as variações ambientais de uma bacia. Sendo que estes foram descritos sucintamente na seção 2.4.

Para definir os critérios de Relevo, Solo e Clima baseou-se na metodologia de Ross (1994), esses foram classificados em 5 classes: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. A cada uma dessas classes associou-se um valor numérico entre 1 e 5 como pode ser observado no Quadro 10.

Valor	Fragilidade
1	Muito Baixa
2	Baixa
3	Média
4	Alta
5	Muito Alta

QUADRO 10 – CLASSES DO RELEVO, SOLO E CLIMA
FONTE: Autora, 2013.

Para a caracterização da geologia da unidade de estudo se utilizou a metodologia apresentada por Crepani em 1996, a qual classifica a fragilidade ambiental relacionada à litologia em 5 classes: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Assim como para os critérios anteriormente citados, esse também foi valorado entre 1 e 5, como observa-se no Quadro 11.

Valor	Fragilidade
1	Muito Baixa
2	Baixa
3	Média
4	Alta
5	Muito Alta

QUADRO 11 – CLASSES DAS ROCHAS
FONTE: Autora, 2013.

Para o critério de ocupação humana utilizou-se na modelagem as características do Quadro 12, para qualificar as áreas de acordo com o índice de fragilidade ambiental de média a alta em função da poluição do ar, água, solo e geração e detritos devido à ação antrópica.

Ação Antrópica	Fragilidade	Valor
Estradas, sem ocupação	Muito Baixa	1
Edificações sem aglomerado humano, loteamento, armazém, silo	Baixa	2
Indústrias, aglomerados humano (área urbana baixa e média) com tratamento de detritos ⁷	Média	3
Indústrias e aglomerados humanos (área urbana alta) com tratamento de detritos, aglomerados humano (área urbana baixa, média e alta) com tratamento de detritos parcial (vila), áreas de mineração, areais e granja	Alta	4
Indústrias e aglomerados urbanos sem tratamento de detritos	Muito Alta	5

QUADRO 12 – DESCRITORES DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL EM FUNÇÃO DA OCUPAÇÃO HUMANA NA ÁREA.
FONTE: Autora, 2013.

⁷ As áreas teste dentro da região metropolitana de Curitiba possuem coleta de lixo, água e esgoto em 90% dos casos, isso só não ocorre em áreas mais distantes que estão mapeadas como vilas. Nessas áreas, geralmente, só há coleta de lixo, sem tratamento de esgoto.

A inserção do critério Áreas de Preservação Permanente, descrito no Quadro 13, utilizado no modelo matemático para a determinação dos índices de fragilidade ambiental embasa-se nas leis ambientais do país, porém adaptado para áreas urbanas. As áreas de APP são consideradas mais frágeis, porque qualquer tipo de mudança acaba afetando ecossistemas extremamente ricos e qualquer modificação nesse sistema vai causar mais problemas que em outras áreas. Nessa modelagem se mapeia as áreas que deveriam ser APP e os entornos dos corpos de água em áreas urbanas. Esse critério é subdividido em 3 classes: alto, médio e baixo. O índice de fragilidade ambiental classifica como alto para as áreas de Preservação Permanente, também corpos de água em área urbana sejam naturais ou artificiais, pois são áreas mais frágeis, qualquer alteração nesses ambientes gerará perdas e danos a todo o ecossistema. São consideradas médio áreas que distam até 500 metros das áreas classe alto, essas áreas possuem ligação direta com o ecossistema mais frágeis e conseqüentemente qualquer alteração nessa área influenciará nesses ecossistemas. Para as outras áreas que distam mais que 500 metros são classificadas como índice de fragilidade baixo, como pode se observar no Quadro 13.

Existência de Áreas de Preservação Permanente	Fragilidade
Áreas de Preservação e corpos de água em área urbana sejam naturais ou artificiais, 30 metros em seu entorno.	Alta
Áreas que distam até 500 metros de Áreas de Preservação e de corpos de água em área urbana sejam naturais ou artificiais.	Média
Outras	Baixa

QUADRO 13 – DESCRITORES DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL EM FUNÇÃO DA OCUPAÇÃO HUMANA NA ÁREA.

FONTE: Autora, 2013.

A delimitação das áreas de APP permite que durante a modelagem seja possível correlacionar essa informação com a de cobertura vegetal, mapeando as áreas em que estas deveriam ser preservadas por serem regiões mais sensíveis ou pela preservação de mananciais ou por espécies nativas e infelizmente estão degradadas, conferindo a essas áreas um maior índice de fragilidade ambiental, chamando a atenção para os órgãos gestores para aplicação de políticas públicas para regeneração dessas áreas.

3.5 PODERAÇÃO PARA OS CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL

A construção do modelo para a determinação dos índices de fragilidade ambiental, IFA, considera os aspectos envolvidos e a relevância significativa de cada uma dessas variáveis. É estruturado da forma mais simples possível para ser facilmente manipulado, compreendido e poder ser reaplicado em qualquer área, e não ser apenas o descritivo de um caso.

A ponderação para os critérios de definição de áreas de fragilidade ambiental para o desenvolvimento da modelagem IFA utiliza critérios comuns as metodologias de Ross, de Crepani, embasada também em Spörl e com a inserção de outros fatores antrópicos. A utilização de fatores antrópicos galga analisar ainda os efeitos da influência humana ao longo do tempo sobre os sistemas ambientais, relacionados com o desenvolvimento tecnológico, científico e econômico das sociedades humanas. Ou seja, a metodologia desenvolvida visa avaliar as interações dinâmicas que atuam sobre o sistema natural da bacia hidrográfica.

As variáveis determinadas nessa pesquisa para a definição das áreas de fragilidade ambiental como já citadas anteriormente são: relevo, solo, rocha, cobertura vegetal/ uso da terra, clima, ocupação humana e áreas de preservação permanente. Sendo que cada uma dessas variáveis será classificada em subclasses como pode ser observado no Quadro 14.

Variáveis	Classes de Fragilidade Ambiental					Fundamentação
Relevo	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta	Ross (1994)
Solos	Muito Baixa	Alta	Média	Alta	Muito alta	Ross (1994)
Rochas	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta	Crepani (1996)
Cobertura Vegetal/Uso da Terra	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta	Guerra e Cunha (2003)
Clima	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta	Ross (1994)
Ocupação Humana	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta	Autora (2013)
Áreas de Preservação Permanente	Baixa	Média		Alta		Autora (2013)

QUADRO 14 – CLASSES DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA MODELAGEM IFA.

FONTE: Autora, 2013.

Baseando-se na pesquisa de Spörl (2007) a declividade (relevo) é considerada a variável com maior peso, por ser unânime entre todos os especialistas consultados por ela, como sendo um critério essencial para a determinação dos índices de fragilidade ambiental.

Neste modelo desenvolvido, IFA, o segundo fator de grande importância na determinação dos índices de fragilidade é a cobertura vegetal e uso da terra, seguido por áreas de preservação permanente e ocupação humana. E por fim, são considerados os critérios: clima, solo e rochas. Esses critérios são ponderados para o modelo com valores variando de 7 a 1, como se observa no Quadro 15. A opção por esses pesos se deu após uma série de testes com variações nos pesos e visualização dos mapas de fragilidade gerados, considerando capacidade do modelo em demarcar ou não de áreas conhecidas de risco ambiental dentro da Bacia do Rio Iraí. Outro fator essencial na determinação dos pesos dos parâmetros foi a escala de dados disponíveis no Brasil por órgãos oficiais e a disponibilidade de informações da qualidade desses dados. Por exemplo, os dados disponíveis de solo pelo IBGE não possuem maiores informações além da escala do dado, sabe-se que esses são junções de informações IBGE e Embrapa de diversas épocas que foram interpolados para a geração de mapas temáticos.

	Critérios	Peso
1	Declividade do Terreno (Relevo)	7
2	Cobertura Vegetal e Uso do Solo	6
3	Áreas de Preservação	6
4	Ocupação Humana	5
5	Tipo de Solo	1
6	Rochas (Litologia)	1
7	Clima	1

QUADRO 15 – PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS CLASSES DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NA MODELAGEM IFA.

FONTE: Autora, 2013.

Baseado nos modelos de fragilidade ambiental de Ross (1994) e Crepani (1996) desenvolveu-se um novo modelo matemático adaptando esses dois modelos. Esses modelos lineares para a determinação dos índices são apresentados por Spörl (2007) através das fórmulas 3.5.1 e 3.5.2:

$$GF_{\text{Crepani}} = 0,2.C_1 + 0,2.C_2 + 0,2.C_3 + 0,2.C_4 + 0,2.C_5 \quad (3.5.1)$$

$$GF_{\text{Ross}} = 125.(C_1 - 1) + 25.(C_2 - 1) + 5.(C_3 - 1) + 1.(C_4 - 1) \quad (3.5.2)$$

Sendo:

GF Grau de fragilidade;

C_1 Grau de fragilidade relativo ao índice de dissecação do relevo;

C_2 Grau de fragilidade relativo ao solo;

C_3 Grau de fragilidade relativo ao uso da terra/cobertura vegetal;

C_4 Grau de fragilidade relativo aos dados climatológicos;

C_5 Grau de fragilidade relativo aos dados geológicos.

Adaptando esses modelos e utilizando os pesos do Quadro 16 chegou-se ao modelo linear apresentado na fórmula 3.5.3.

$$GF_{\text{IFA}} = 7.C_1 + C_2 + 6.C_3 + C_4 + C_5 + 5.C_6 + 6.C_7 \quad (3.5.3)$$

Rearranjando os fatores em função de seu coeficiente chega-se à equação 3.5.4.

$$GF_{\text{IFA}} = 7.C_1 + 6.C_3 + 6.C_7 + 5.C_6 + C_2 + C_4 + C_5 \quad (3.5.4)$$

Sendo:

C_6 Grau de fragilidade relativo a ocupação humana;

C_7 Grau de fragilidade relativo à existência de áreas de preservação permanente.

Aplicando esse modelo para as duas situações mais extremas, delimita-se que o GF_{IFA} apresentará valores variando entre 0 e 123. Esse intervalo foi subdividido em 5 classes: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, as quais podem ser observadas no Quadro 18. A classe muito baixa foi delimitada baseando nas situações em que os parâmetros de modelagem fossem baixos e muito baixos para: declividade, ação antrópica, áreas de APP e uso do solo e também para situações em que houvesse ausência de algum parâmetro. Para a delimitação da classe muito

alta verificou-se a situação em que o parâmetro declividade fosse muito alto ou alto e todos os outros parâmetros fossem classificados como muito baixo. As outras classes intermediárias foram subdivididas em intervalos iguais.

Classes	Índice de Fragilidade Ambiental	Intervalo da Classe
1	Muito Baixa	0 – 34
2	Baixa	34 – 41
3	Média	41 – 48
4	Alta	48 – 55
5	Muito Alta	55 – 123

QUADRO 16 – INTERVALO DE CLASSES DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO.
FONTE: Autora, 2013.

3.6 AVALIAÇÃO DO MODELO DE DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL

Para o desenvolvimento da modelagem dos índices de fragilidade ambiental e sua posterior implementação no protótipo de sistema especialista é importante, se não um passo crítico, realizar simulações e comparar hipóteses do modelo e comportamentos de forma consistente e padronizada.

Nessa pesquisa foi proposto avaliar o modelo sobre vários aspectos:

- Avaliar os resultados gerados em função das ponderações dos parâmetros do modelo IFA utilizando visitas in loco (Seção 3.6.1)
- Avaliar os resultados gerados em função das ponderações dos parâmetros do modelo IFA utilizando questionários (Seção 3.6.2)
- Comparar a modelo IFA com modelos de Ross e Crepani (Seção 3.6.3)
- Avaliar a contribuição de cada parâmetro na modelagem proposta (Seção 3.6.4)
- Avaliar o que a variações de escala de dados no modelo provoca nos resultados finais (Seção 3.6.5)

Nas seções 3.6.3, 3.6.4 e 3.6.5 utilizou-se a autocorrelação espacial, a qual permite identificar o grau em que os objetos ou atividades em algum lugar sobre a

superfície da terra são semelhantes a outros objetos ou atividades localizados nas proximidades, pois se considera que a variação de todos os fenômenos é dependente da sua localização. Goodchild (1986) define autocorrelação espacial como um índice descritivo, o qual mede os aspectos da forma como as coisas são distribuídas no espaço, mas, ao mesmo tempo, pode ser visto como um processo que mede o grau de influência exercida por algo sobre os seus vizinhos. O mesmo esclarece que a autocorrelação espacial é um conjunto relativamente pequeno de técnicas que lida simultaneamente com informações tanto de localização e atributo, ou seja, se preocupa com a comparação de dois tipos de informação, a similaridade entre atributos e à semelhança da sua localização.

As comparações realizadas foram aplicadas em três bacias hidrográficas com características físicas e bióticas divergentes, visando verificar se o modelo não é tendencioso para um determinado cenário podendo futuramente ser aplicado em qualquer bacia.

3.6.1 Proposição de avaliação do modelo de determinação de índices de fragilidade ambiental

Para avaliar a qualidade da modelagem, desenvolvida nesta pesquisa, IFA, a proposta inicial para a validação do modelo para determinação dos índices de fragilidade ambiental consistiu em convidar alguns especialistas para realizar uma visita in loco, de algumas áreas, para a geração de um parecer de fragilidade ambiental dessas áreas na bacia. Eles foram levados às áreas com informações do tipo de solo, litologia, clima e definiram o índice de fragilidade ambiental do local baseado em sua experiência.

3.6.2 Avaliação do modelo de determinação de índices de fragilidade ambiental baseada em questionário

Para dar continuidade na avaliação da qualidade da modelagem, convidaram-se alguns especialistas de áreas distintas relacionadas a pesquisas sobre fragilidade ambiental. Eles colaboraram realizando a avaliação de algumas áreas dentro da bacia, respondendo a um questionário, o qual foi desenvolvido especificamente para

gerar um parecer sobre o índice de fragilidade ambiental baseado na experiência pessoal de cada especialista.

O questionário era composto por imagens aéreas e outras questões relevantes como tipo de solo, clima e litologia; os avaliadores classificavam as áreas em índices de fragilidade: muito alto, alto, médio, baixo ou muito baixo e selecionavam os parâmetros que mais influenciaram na decisão, como por exemplo: ação antrópica, tipo de cobertura vegetal. E sequencialmente eles descreviam sucintamente qual o motivo da inclusão da área na classe de índice de fragilidade, o que foi mais relevante na opção por esse índice (Anexo 8.1).

3.6.3 Comparação de modelos de diagnóstico de índices de fragilidade ambiental existentes

A modelagem ambiental IFA desenvolvida foi confrontada, utilizando a metodologia proposta por Spori (2007), com modelos existentes dos especialistas Ross (1994) e Crepani et al. (2001). Realizou-se a comparação entre os mapas de índice de fragilidade ambiental gerados pelo modelo IFA com os resultados gerados utilizando os modelos de Ross e Crepani.

A metodologia de Crepani classifica os níveis de vulnerabilidade ambiental entre 1 e 3 (Quadro 17), sendo que áreas que obtêm valores mais próximos ou igual a 1 são os ambientes mais estáveis, na quais prevalece a pedogênese. Aquelas com valores em torno de 2 são áreas intermediárias, nas quais existe um equilíbrio entre a pedogênese e a morfogênese, e com valores em torno de 3 são mais instáveis, prevalece a morfogênese. E classifica os índices ou graus de fragilidade ambiental em 5 classes: muito baixa, baixa, média, forte e muito forte.

Classes	Índice de Fragilidade Ambiental	Intervalo da Classe
1	Muito Baixa	1,0 – 1,4
2	Baixa	1,4 – 1,8
3	Média	1,8 – 2,2
4	Alta	2,2 – 2,6
5	Muito Alta	2,6 – 3,0

QUADRO 17 – INTERVALO DE CLASSES DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DE CREPANI.

FONTE: Spori, 2007.

E o intervalo de classes para o modelo de Ross foi obtido da metodologia proposta por Sporn, sendo que este recomendou que os dados numéricos ordenados resultantes do modelo fossem divididos em 5 partes iguais, cada uma contendo 20% das áreas territoriais de cada bacia.

3.6.4 Comparação de modelos de diagnóstico de índices de fragilidade ambiental com variação dos parâmetros de entrada de dados

Para averiguar a contribuição de cada parâmetro na modelagem proposta, geraram-se mapas de índices de fragilidade ambiental, com parâmetros de entradas de dados diferentes. Utilizou-se como padrão de comparação o modelo IFA com todos os parâmetros propostos. Sequencialmente geraram-se mapas com a eliminação de um ou mais parâmetros, visando através dessa comparação verificar a contribuição de cada um dos critérios para determinação de índices de fragilidade ambiental analisando a sua influência no resultado final.

3.6.5 Comparação de modelos com variações de escala de dados no modelo

Avaliou-se também a alteração de resolução de dados no modelo proposto. Para isso gerou-se um mapa utilizando a resolução sugerida na Seção 3.3.2 como um padrão de comparação. Posteriormente degradou-se a resolução de todos os parâmetros envolvidos na modelagem simultaneamente, geraram-se dados com resolução final de 15m até 100m com variação de 5m, resultando num total de 19 mapas de índice de fragilidade para cada bacia.

3.7 CRITÉRIOS DEFINIDORES DO SISTEMA ESPECIALISTA IFA

Nesta seção são apresentadas as definições para o projeto e desenvolvimento do protótipo de sistema especialista denominado IFA. Nesse sistema almeja-se implementar a modelagem IFA para gerar índices de fragilidade ambiental que possam ser utilizados por usuários em geral. Esse sistema almeja possuir como principais características: inferir decisões como um especialista humano perito em determinação de índices de fragilidade ambiental.

Para automatizar as decisões necessárias para o mapeamento dos índices de fragilidade ambiental, formalizar esse conhecimento, utilizou-se uma árvore de decisão através de um conjunto de regras. Essas regras permitem traduzir os dados descritivos para dados aceitáveis no modelo linear. Essas regras são disparadas em função inicialmente da escolha da modelagem para determinação dos índices de fragilidade, pois cada modelo (IFA, Ross e Crepani) possui disponibilidade de diferentes parâmetros.

O usuário do sistema possui a alternativa de acessar os dados das bacias existentes na base do sistema, ou então, inserir uma nova bacia. Na Figura 5, pode-se observar um organograma simplificado do algoritmo do protótipo de SE.

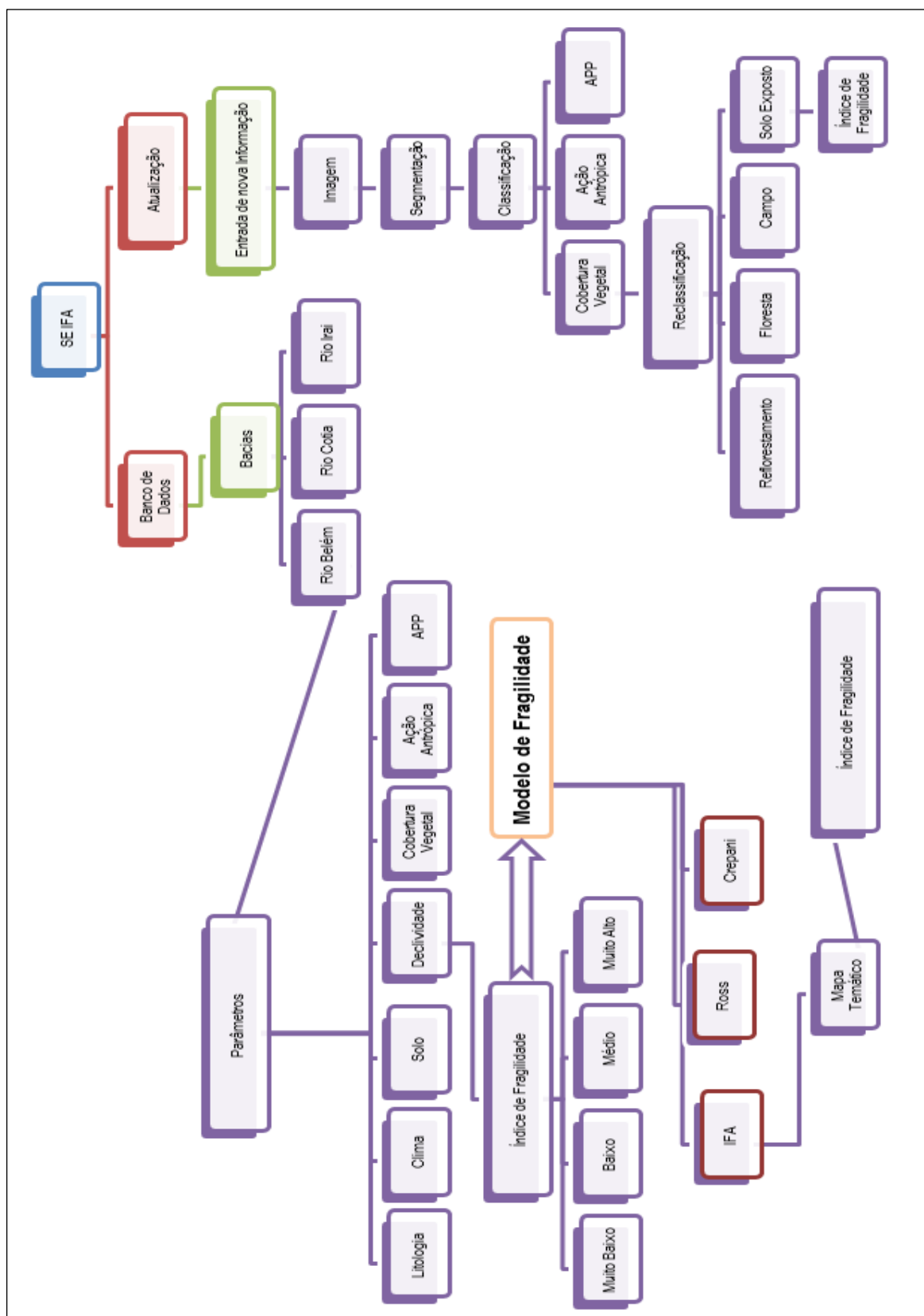


FIGURA 5 – ORGANOGRAMA DO SISTEMA ESPECIALISTA.
FONTE: Autora (2013)

A primeira opção acessa diretamente a base de dados e associa a base de regras para a geração de um mapa temático da bacia desejada. Ao iniciar o sistema especialista esse deve permite definir quais os parâmetros serão utilizados na modelagem. Ao definir o parâmetro o sistema acessa sua base de dados, a qual é constituída por mapas temáticos dos órgãos oficiais. Cada um desses mapas passa por processo de reclassificação através de uma árvore de decisão. Por exemplo, ao se modelar a Bacia do Rio Iraí, o sistema ao acessar o mapa temático de ação antrópica (Figura 6), reclassifica as classes área alagada, área industrial, área urbana baixa, armazéns/silo, granja, mineração/areia, mineração/outros, vila em índices de fragilidade associados a ação antrópica muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Essa reclassificação considera as definições da seção 3.4, assim as áreas industriais são reclassificadas em índice de fragilidade médio, o mesmo ocorre com todas as outras classes, por fim o sistema gera um novo mapa temático.

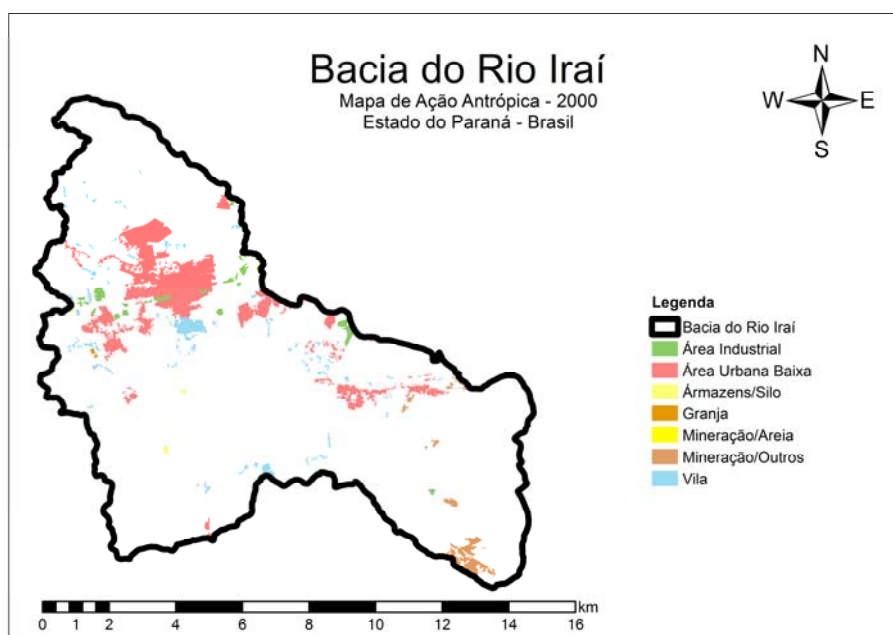


FIGURA 6 – AÇÃO ANTRÓPICA DA BACIA DO RIO IRAÍ.
FONTE: Autora (2013)

Esse novo mapa tem associado a cada uma de suas células um valor numérico correlacionado com o índice de fragilidade parcial (Figura 7). Da mesma forma todos os outros mapas.

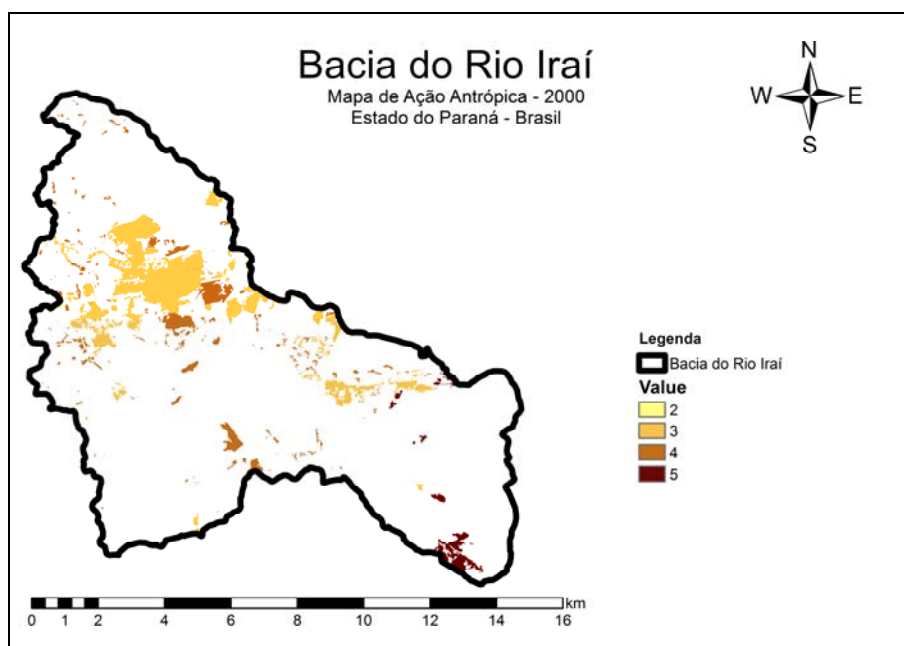


FIGURA 7 – ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA AÇÃO ANTRÓPICA DA BACIA DO RIO IRAÍ.

FONTE: Autora (2013)

Com todas as imagens reclassificadas essas são entram em um processo de aritmética matricial gerando um novo mapa temático com o índice de fragilidade ambiental associando todos os parâmetros.

A segunda opção faz com que o sistema entre em um processo de atualização da base de dados, no qual o usuário interage com o sistema inserindo uma imagem de uma área de interesse. Essa imagem passa por um processo de classificação associado diretamente a uma base de regras. Nesse caso, o usuário, precisa entrar com uma imagem, essa é segmentada e classificada em cobertura vegetal, ação antrópica e APP. Sequencialmente cada parâmetro é reclassificado em subclasses, por exemplo, a cobertura vegetal é reclassificada em reflorestamento, floresta, campo e solo exposto. Após esse processo é associado o índice de fragilidade para cada subclasse. O mesmo ocorre com ação antrópica e APP. E então se opta por uma modelagem linear Ross, IFA ou Crepani. Esses dados são modelados e gera-se uma nova imagem.

Após essa modelagem os resultados precisam ser representados através de mapas temáticos, nos quais as imagens resultantes de cada modelagem são associadas com um nível de classificação pré-estabelecido, através da árvore baseada em regras.

Nas situações de inserção de uma nova bacia, a atualização da base ainda ocorre de maneira simplificada. Pois, existe a necessidade de otimizar o sistema para adaptá-lo para formatos de imagens diferenciadas e resoluções diferenciadas. Porém, esse processo é bastante oneroso em questão tempo e dificuldade computacional, sendo que a proposta do protótipo de SE é somente verificar a viabilidade técnica de uso, sendo que as adaptações serão realizadas posteriormente ao término dessa tese. Nessa fase inicial o protótipo ainda aceita somente a entrada de dados matriciais, porém, vislumbra-se que o sistema permita a entrada de dados vetoriais.

3.8 FUNDAMENTAÇÃO DE MAPEAMENTO NO SISTEMA ESPECIALISTA

Nesta seção é discutida a forma de mapeamento utilizada para descrever os critérios de definição de áreas de fragilidade ambiental. Nela determinaram-se quais os tipos de mapas temáticos que melhor descrevem a matriz espacial dos dados, e como representar estas distribuições de fenômenos no espaço.

O protótipo de sistema especialista no decorrer do processo de classificação das áreas de fragilidade gera uma série de mapas, e é essencial que cada um desses mapas construídos consiga comunicar informações relevantes para os seus usuários, ou seja, que a comunicação cartográfica seja eficiente.

Para a definição da linguagem cartográfica para a representação dessas informações temáticas levou-se em consideração a necessidade de que essa fosse facilmente entendida por qualquer usuário, mesmo aquele que não esteja familiarizado com o uso de produtos cartográficos. Devido a essa necessidade optou-se por representar os índices de fragilidade ambiental com a primitiva gráfica área, com variável visual valor de cor. E para a definição do conjunto de cores adequados utilizou-se o software ColorBrewer 2.0, o qual oferece uma série de esquemas de cores para mapas temáticos que permite a representação e mapeamento de dados de forma clara. Esse software foi projetado pela cartógrafa norte-americana Cynthia Brewer (2009) para ser uma ferramenta de diagnóstico visando avaliar a consistência de esquemas de cores individuais, tornando os dados representados em mapas mais fáceis de distinguir.

A necessidade de se buscar uma metodologia já existente para a representação final dos dados foi consequência de observar que um conjunto de valores de cor, escolhido de forma aleatória, pode servir para representar uma área de forma muito eficiente, porém, com uma nova distribuição dos dados, o que era um esquema eficiente pode deixar de ser. Uma redistribuição dos dados pode fazer com que o esquema de representação escolhido gere resultados indesejáveis, como a impossibilidade de visualização de áreas de maior fragilidade, ou então a impossibilidade de separação visual de classes muito próximas. Essa situação se torna uma questão muito importante dentro de um SE, considerando que esses sistemas não terão a possibilidade de maior interação usuário final e produto gerado. E se o SE oferecer uma modelagem adequada, que consiga representar e exaltar as áreas de maior índice de fragilidade ambiental, porém quando há descaso na representação dos resultados essa modelagem pode parecer ineficiente.

No sistema especialista IFA são gerados mapas temáticos com dados ordenados e dados nominais. Para o primeiro utilizou-se esquemas de cores sequenciais, nos quais as classes mais baixas (por exemplo, índice de fragilidade ambiental muito baixo) foram representadas com cores mais claras e as classes mais altas com cores mais escuras. E para os dados nominais utilizaram-se esquemas de cores qualitativos, nos quais há variação no tom de cor entre os dados representados, por exemplo, vegetação será representada em verde e área urbana em amarelo.

4. EXPERIMENTOS

Neste capítulo testou-se a metodologia proposta aplicando a modelagem ambiental à Bacia do Alto Iguaçu, dentro da qual foram selecionadas três áreas de estudo: Bacia do Rio Iraí, Bacia do Rio Belém e Bacia do Rio Cotia. A organização do capítulo apresenta na seção 4.1 a descrição da área de estudo e na seção 4.2 resultados e discussão.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo para a realização deste trabalho fica inserida na bacia do Alto Iguaçu, a qual abrange Curitiba e municípios: Colombo, Campina Grande do Sul, Quatro Barras, Piraquara, Pinhais, São José dos Pinhais, Fazenda Rio Grande, Mandirituba, Araucária, Contenda, Balsa Nova, Campo Largo, Campo Magro e Almirante Tamandaré. Essa bacia abrange desde suas cabeceiras, situadas nos contrafortes ocidentais da Serra do Mar, até as corredeiras situadas no município de Porto Amazonas, compreendendo uma área parcial de 3.638 km² (SUDERHSA, 2007).

A região apresenta média anual de pluviosidade de 1.400 mm, e o clima segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb – subtropical mesotérmico úmido, sem estação seca, com verões suaves e invernos relativamente frios. A declividade da região é bastante variada, possui desde áreas de altas declividades até áreas mais planas.

Dentro dessa bacia foram escolhidas três sub-bacias, com características diferenciadas, principalmente quanto à cobertura vegetal e ao uso do solo. As bacias selecionadas para o estudo foram: Iraí, Belém, Cotia (Figura 8), a primeira possui áreas de com cobertura vegetal bem conservada, a segunda possui grande concentração populacional e atividades industriais, e a terceira é constituída por áreas rurais.

população. Consequentemente suas águas são poluídas e contaminadas por esgotos domésticos e resíduos sólidos. E nas margens de seus rios existe uma série de ocupações irregulares sendo que a bacia possui apenas 10% da sua mata ciliar preservada.

4.1.2 Bacia Hidrográfica do Rio Cotia

A Bacia Hidrográfica do Rio Cotia é uma região predominante agrícola e pastoril, sua área é recoberta por regiões de campo e culturas temporárias. Pequenas áreas com ocupação industrial, para as quais a captação de água vem do Rio Cotia. Segundo o relatório do Projeto Águas do Amanhã (2011) essa bacia possui uma área de aproximadamente 80,08 km², com uma população de aproximadamente 2.949 pessoas e restam cerca de 55,7% da área de mata ciliar.

4.1.3 Bacia Hidrográfica do Rio Iraí

A Bacia Hidrográfica do Rio Iraí fica localizada a nordeste da Região Metropolitana de Curitiba, essa bacia apresenta regiões bastante conservadas. Este fato se deve, em grande parte, por ter nela ter sido criada a APA Estadual do Iraí, através do DECRETO Nº 1753 - 06/05/1996. Com o objetivo de proteger e conservar a qualidade ambiental dos sistemas naturais ali existentes, em especial a qualidade e quantidade de água para fins de abastecimento público.

Porém, relatório da SUDERHSA (2007), indica que a região apresenta forte tendência ao crescimento populacional; Influência do sistema viário na formação de manchas urbanas de ocupações irregulares devido ao Contorno Leste; existência de empreendimentos minerários dentro da APA do Iraí na cabeceira do Rio Curralinho; o entorno do reservatório Iraí cercado por áreas agropastoris com manejo inadequado do solo o que vêm contribuindo para a contaminação do solo e dos corpos de água adjacentes; e as águas apresentam nível elevado de Fósforo; além das margens do rio ocupadas por parcelamentos iniciados na década de 50 e apresentarem um extraordinário crescimento populacional. As consequências dessas ações antrópicas são o aumento das áreas de degradação dentro da bacia, ocasionando prejuízos não só para os recursos hídricos, mas também ao ar, solo, fauna e flora.

No Quadro 18 é apresentado um resumo das características das três bacias, como a percentagem de mata ciliar remanescente, área, população e qualidade geral da água.

Bacia Hidrográfica	Área (km ²)	População total em 2010 (urbana e rural)	Mata Ciliar Remanescente	Qualidade da Água
Rio Belém	87,62	474.421	10,4%	Poluída
Rio Cotia	80,08	2.949	55,7%	Medianamente poluída
Rio Iraí	111,78	49.891	51,1%	Poluída

QUADRO 18 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS ANALISADAS.
Fonte: Adaptado de Projeto Águas do Amanhã (2011)

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.2.1 comparação do modelo IFA com parecer de fragilidade in loco

Para validar a modelagem IFA foram escolhidas quatro áreas testes com características distintas dentro da Bacia do Rio Belém (Figura 9). Optou-se por essas áreas em face de que elas se localizam em locais que não sofreram alterações físicas significativas e também por oferecerem fácil acesso. A análise com relação as alterações físicas foi detectada após se realizar uma fotointerpretação temporal entre as ortofotos de 2002, empregadas na modelagem IFA, com relação a imagens atuais, desta forma não houve incoerências nas análises in loco com a modelagem. Além dessa característica, o fácil acesso a área foi essencial para permitir o menor tempo de deslocamento entre as áreas.

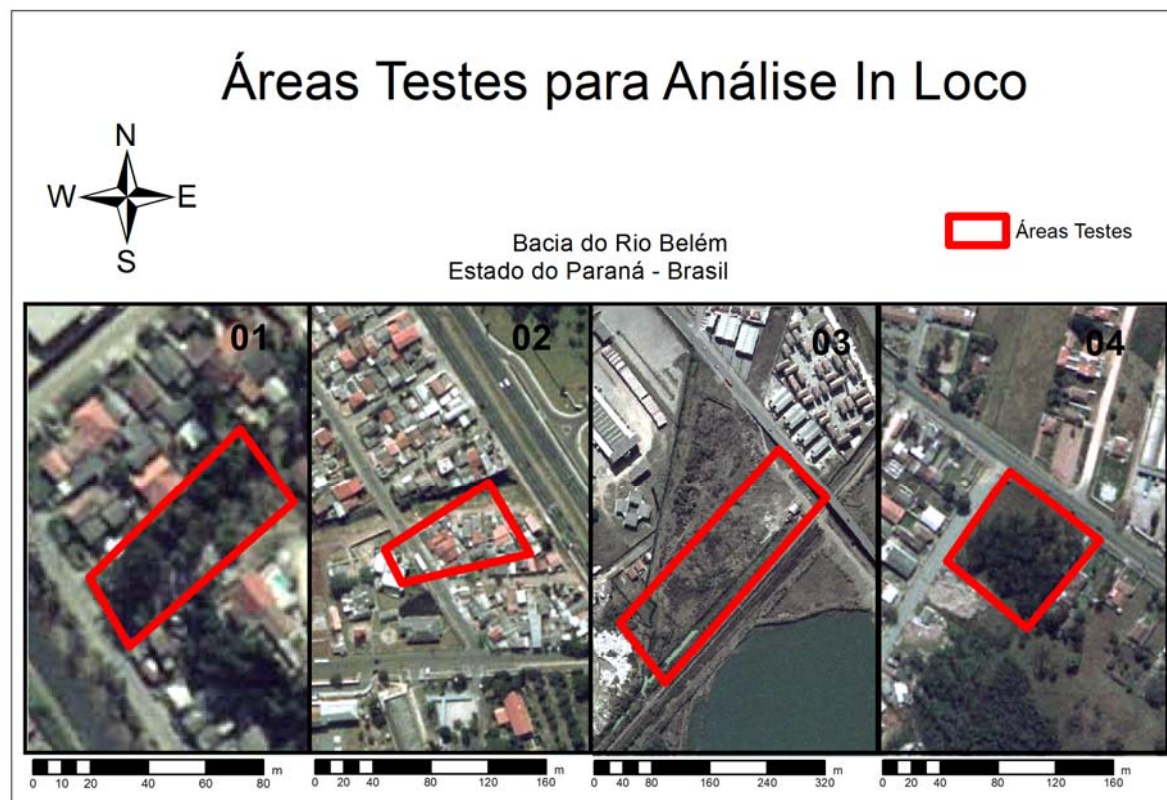


FIGURA 9 – ÁREAS TESTES NAS BACIAS DO RIO BELÉM QUE FORAM AVALIADAS IN LOCO.
FONTE: Autora (2013)

Foram convidados cinco especialistas em avaliações ambientais para realizar uma visita in loco. Cada especialista visitou as áreas em momentos distintos e recebeu um pequeno resumo das características da área (Anexo 8.1) retiradas dos mapas temáticos dos órgãos oficiais (IBGE e Instituto de Águas do Paraná). Eles foram orientados a definir um índice de fragilidade ambiental para cada área, o qual deveria ser muito baixo, baixo, médio, alto ou muito alto. Essa classificação foi baseada somente em sua experiência e conhecimentos. Os especialistas foram ainda questionados quanto ao motivo da inclusão da área em determinada classe de índice de fragilidade e qual foi o aspecto mais relevante nessa escolha.

Na área Teste 1 (Figura 10) houve algumas divergências quanto ao índice associado pelos especialistas. Seu índice variou de médio a muito alto dependendo da área de formação do especialista, sendo que 60% dos especialistas consideraram o grau de fragilidade desta área muito alto e o restante como médio. A modelagem IFA, classificou a área com um índice de fragilidade muito alto, principalmente em face da distância que ela se situa de um corpo de água. As

questões que mais influenciaram na determinação do índice pelos especialistas foram:

- A área passa uma falsa impressão de conservação, devido à área ser ampla. Ela apresenta vegetação em estado sucessional primário, que aparentemente não sofreu corte aproximadamente nos últimos 10 a 15 anos, como é visto na Figura 8.
- Existem poucas formações arbóreas nativas, o que indica que houve intervenção antrópica na área, e faz com que o solo tenha menos proteção.
- Existe pressão antrópica no entorno.
- Focos de lixo.
- Área é plana, uma região de desemboque de rios, e com lençol freático elevado mais propenso a poluição.

A demarcação do sistema IFA para área, mesmo não havendo consenso entre os especialistas, se mostrou válida, porque essa área merece uma atenção dos órgãos gestores de Curitiba. Caso a área não se torne um parque público há uma tendência de que ela acabe se transformando em um grande lixão.



FIGURA 10 – VISTA GERAL DA ÁREA TESTE 01.
 FONTE: Autora (2013)

O índice de fragilidade associado para área teste 02 (Figura 11) pelos especialistas foi baixo, e com a modelagem IFA obteve-se um índice de fragilidade muito baixo e baixo. Os aspectos mais relevantes destacados pelos especialistas foram:

- Área plana e recoberta por vegetação arbórea protegida (Araucárias).
- Essa está a menos de 500 metros de corpos de água e possui lençol freático elevado. Esse seria um dos únicos aspectos que poderiam gerar problemas futuros dependendo da mudança de uso do solo na área.
- O estado de conservação da área é bom, e mesmo que haja uma ação antrópica no entorno, não haverá acúmulo de lixo na área.
- Já existe um ecossistema fixado, porém a biodiversidade é pequena, pois a área é isolada e não existe uma troca gênica, o que atrapalha a conservação em longo prazo.



FIGURA 11 – VISTA GERAL DA ÁREA TESTE 02
FONTE: Autora (2013)

Para a área Teste 03 (Figura 12) os pareceres técnicos emitidos conduziram a um índice de fragilidade muito alto, sendo este o mesmo advindo da modelagem IFA. Os aspectos mais relevantes para essa classificação citados pelos especialistas foram:

- Pressão antrópica extrema, área de baixo desenvolvimento econômico, na qual as casas se localizam praticamente dentro do rio.
- Existe muito lixo no entorno do rio.
- Existe tratamento parcial de dejetos, mas o rio parece ser extremamente poluído.
- Praticamente não existe mata ciliar.
- Solo foi prejudicado de forma permanente e é propenso a processos de lixiviação.
- Lençol freático da região é alto, e este deve estar contaminado devido à situação da área.
- Região levemente plana com pequena encosta característica de rios.
- Risco social alto.



FIGURA 12 – VISTA GERAL DA ÁREA TESTE 03.
FONTE: Autora (2013)

A área Teste 04 (Figura 13) foi qualificada pelos especialistas consultados como uma área de índice de fragilidade ambiental alto ou muito alto e por meio da modelagem IFA obteve-se o índice muito alto. Nas análises dos especialistas as características destacadas foram:

- A área é recoberta por vegetação secundária num estágio de sucessão avançada, na qual já houve alteração e já houve perdas do meio.
- Existe pressão antrópica do entorno da área extremamente forte, como por exemplo, a presença de acúmulo de lixo e área industrial.

- Há uma variação brusca no relevo, variações de declividade entre 60 e 90%, o que torna a área propensa a processo de lixiviação⁸. Além disso, a vegetação levemente inclinada indica que a área é propensa ao movimento de massa.
- No resumo das características básicas dessa área, devido a problemas na escala dos dados, a área toda é classificada como aluvião, porém na visita in loco constata-se que parte da área é do complexo Atuba, sendo que a área de maior declividade apresenta blocos intemperizados.
- A área se localiza a menos de 30 metros do Rio Belém e é propensa a inundações.



FIGURA 13 – VISTA GERAL DA ÁREA TESTE 04.
FONTE: Autora (2013)

⁸ Lixiviação: processo pelo qual os elementos químicos do solo migram, de forma passiva, das camadas mais superficiais de um solo para as camadas mais profundas, em decorrência de um processo de lavagem devido à ação da água da chuva ou de irrigação, tornando-se indisponíveis para as plantas. Nas regiões de clima úmido, os solos tornam-se estéreis com poucos anos de uso, devido, em grande parte, aos efeitos da lixiviação. Ela também ocorre em vazadouros e aterros de resíduos, quando são dissolvidos e carreados certos poluentes ali presentes para os corpos d'água superficiais e subterrâneos (Embrapa, 2013).

4.2.1.1 Conclusões com relação às análises in loco

As análises realizadas in loco mediante as conversas com especialistas de diversas áreas: engenheiros florestais, geólogos e agrônomo, permitiu verificar que as ponderações associadas à modelagem IFA foram adequadas. Elas mapearam principalmente as áreas de maior índice de fragilidade ambiental, as quais merecem maior atenção dos órgãos gestores nas políticas de gestão e planejamento ambiental.

É importante ressaltar que em algumas situações as opiniões entre os especialistas não foram unânimes. Entre eles percebeu-se que os parâmetros de maior significância foram variáveis, estando sempre mais correlacionado com a sua área de formação ou de atuação profissional. Por exemplo, para o engenheiro florestal o parâmetro cobertura vegetal é o ponto de partida inicial de suas análises, por ser a área de maior conhecimento e na qual ele se sente mais a vontade em realizar críticas. Os geólogos, por sua vez, partem da análise das características geológicas das áreas para efetuarem as suas análises. Já o agrônomo utilizou o parâmetro solo como ponto de partida na sua avaliação.

No entanto, se verificou que para todos os especialistas a observação das características do entorno da área é fundamental quando se almeja determinar o índice de fragilidade da área que esta sendo observada. E o fator alterações antrópicas é preponderante nas decisões do especialista.

Essas análises permitiram verificar a adequabilidade das ponderações associadas aos parâmetros, assim como dos próprios parâmetros utilizados na modelagem IFA. Da mesma forma, as visitas in loco também permitiram verificar que os mapas temáticos disponibilizados em diversas escalas por órgãos oficiais podem não ser consistentes, em muitos casos não expressam de fato o que existe em campo e consequentemente essa característica influencia diretamente as ponderações dos parâmetros. Isso deve em grande parte aos mapas serem gerados com dados de diversas épocas em multiescalas através de métodos de interpolação, e a escala associada a esse produto não ser condizente com a realidade.

4.2.2 Comparação do modelo IFA com questionários

A partir dos resultados promissores obtidos nas visitas in loco da seção 4.1, buscou-se estender as áreas teste de avaliação para as Bacias do Rio Iraí e Rio Cotia, e também ampliar os pareceres de validação do modelo. Essas avaliações foram realizadas através de um questionário específico (Apêndice 8.2), composto por doze áreas testes (Figura 14), sendo quatro áreas em cada bacia. Para as análises se disponibilizava informações básicas da área e também a mesma ortofoto utilizada na modelagem visando a não disparidade das condições de análise.

Esse questionário foi similar aos questionamentos das análises in loco. Cada área foi classificada em índice de fragilidade ambiental muito baixo, baixo, médio, alto ou muito alto. E posteriormente se indicou qual os aspectos mais relevante para essa escolha (ação antrópica na área, uso e ocupação do solo, dados geológicos, tipo de solo, declividade do terreno, APP (área de preservação permanente) e qualidade da água); seguida de uma análise descritiva do motivo de inclusão em determinada classe.

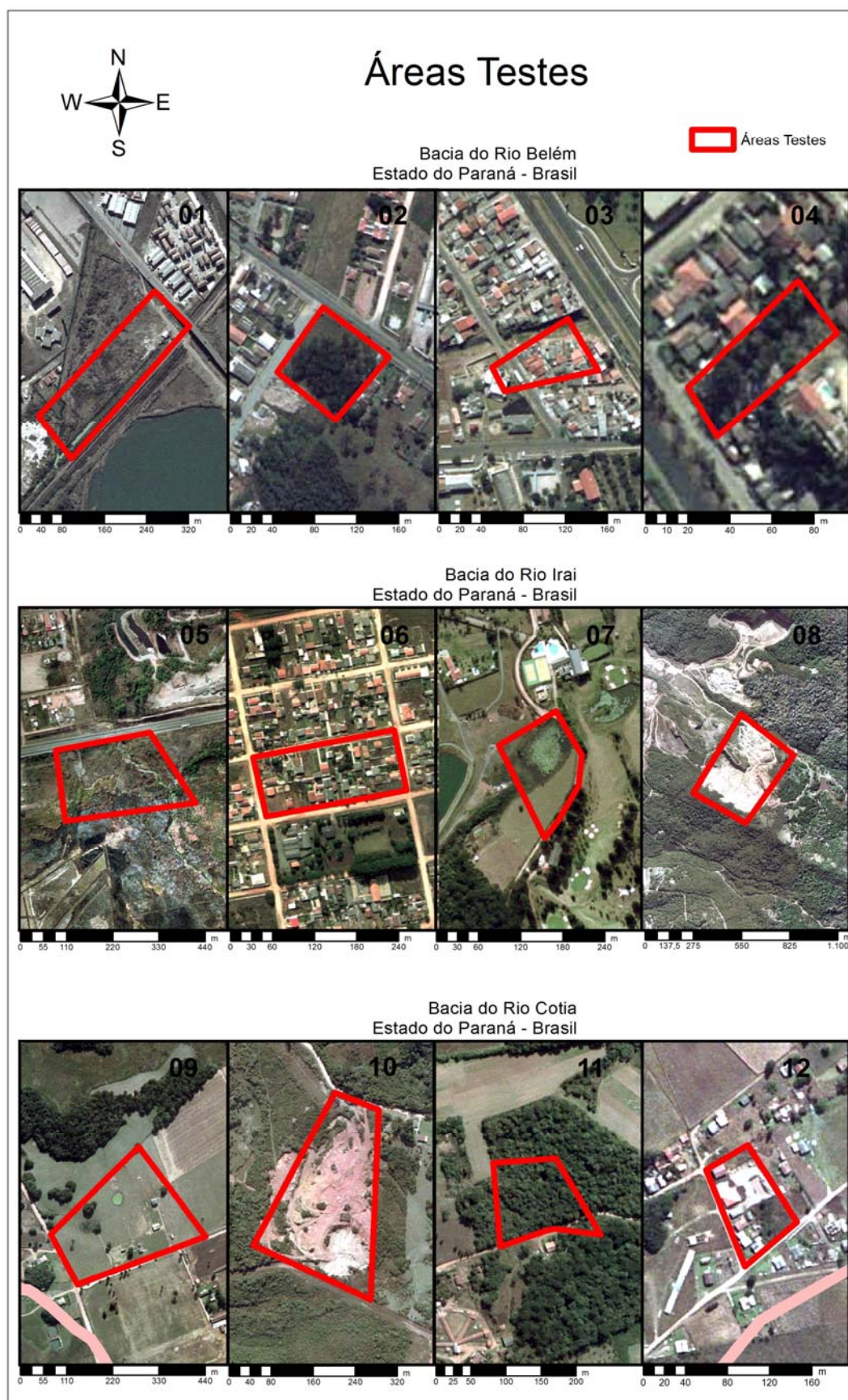


FIGURA 14 – ÁREAS TESTES NAS BACIAS DO RIO BELÉM, RIO IRAÍ E RIO COTIA.
FONTE: Autora (2013)

Colaboraram com a pesquisa um total de 21 especialistas com formação em agronomia, geografia, geologia, engenharia ambiental, engenharia cartográfica, engenharia florestal, engenharia civil e engenharia química ambiental (Figura 15).

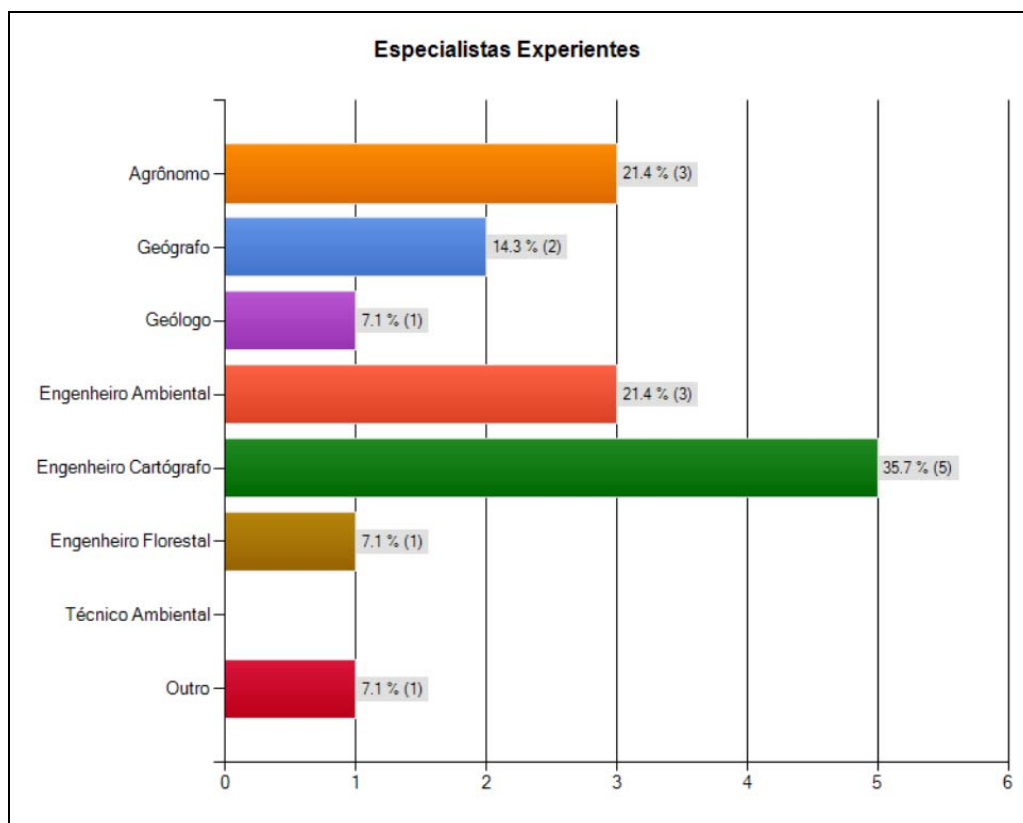


FIGURA 15 – O GRÁFICO DE BARRAS MOSTRA A FORMAÇÃO, DOS ESPECIALISTAS EXPERIENTES QUE RESPONDERAM O QUESTIONÁRIO.
FONTE: Autora (2013)

Desses somente 14 especialistas que possuem experiência mediana ou alta responderam a pesquisa integralmente, o correspondente a 71.4% (Figura 16). Mesmo não havendo uma quantia elevada de avaliações, o que foi considerado extremamente significativo foi a qualidade das análises e a participação de especialistas com vasto conhecimento em questões ambientais, que representaram 50% das amostras totais. Todos os resultados das análises dos especialistas podem ser observados no Apêndice 8.3. Na sequência são apresentados três dos resultados correlacionados aos especialistas que consideram possuir experiência mediana e alta em análises ambientais associados a áreas com diferentes cenários.

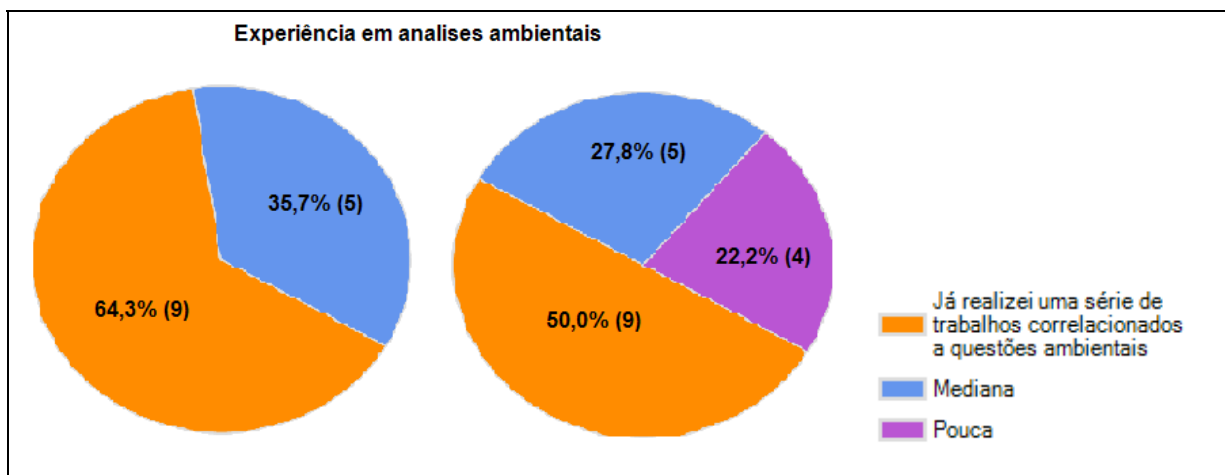


FIGURA 16 – O GRÁFICO DE SETORES CIRCULARES DO LADO ESQUERDO REPRESENTA OS ESPECIALISTAS COM EXPERIÊNCIA ALTA E MEDIANA E O DO LADO DIREITO TODOS OS QUE RESPONDERAM O QUESTIONÁRIO INTEGRALMENTE.
FONTE: Autora (2013)

Na Figura 17, observa-se uma das áreas do questionário, a área Teste 03, a qual se encontra na Bacia Hidrográfica do Rio Belém, localizada no Primeiro Planalto Paranaense dentro da cidade de Curitiba.



FIGURA 17 – ÁREA TESTE 03.
FONTE: Autora (2013)

Essa área possui aproximadamente 3.695 m², sendo uma área densamente povoada, na qual existem uma série de ocupações irregulares e um dos canais pertencentes a Bacia do Rio Belém. Existe intervenção humana em toda a área, como: construção de edificações e estradas. As margens do canal são recobertas por gramíneas e lixo.

Os especialistas experientes classificarão a área Teste 03 com índice de fragilidade ambiental muito alto representam 71,4%, outros 14,3% como índice alto e 14,3% como índice muito baixo.

As características mais relevantes da área foram consideradas a ação antrópica e o uso e ocupação do solo de acordo com a Figura 18. Sendo que os especialistas justificaram a classificação devido à área situar-se muito próxima do rio e possuir ocupação desordenada, o solo da área ser hidromórfico, o qual possui lençol freático aflorante, propenso ao risco de contaminação das águas superficiais e subsuperficiais, devido à geração de contaminantes da água pela atividade antrópica.

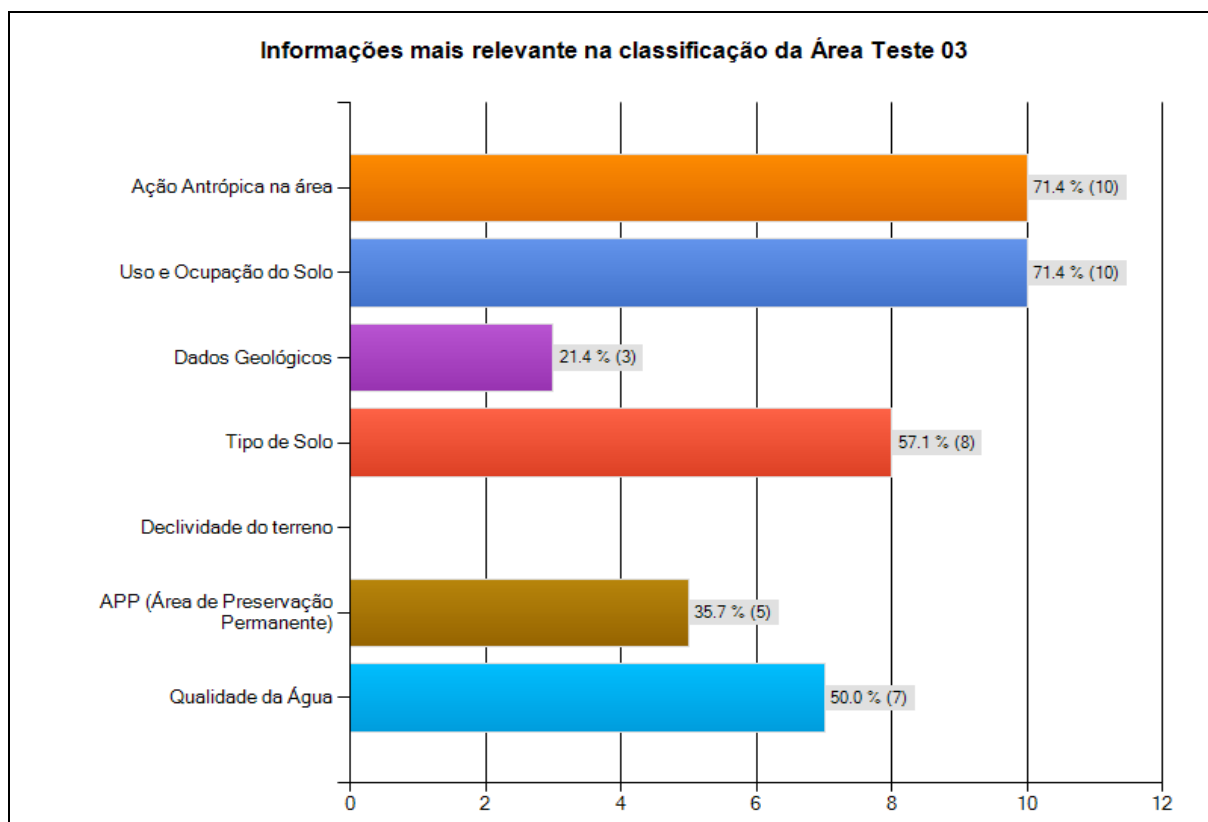


FIGURA 18 – CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIARAM NA CLASSIFICAÇÃO DA ÁREA TESTE 03 SEGUNDO ESPECIALISTAS EXPERIENTES.
FONTE: Autora (2013)

Na Figura 19, observa-se o mapa temático gerado pela modelagem IFA, a qual classificou a área com índice de fragilidade alto. Percebe-se pela semelhança da maior parte das análises dos especialistas com a modelagem IFA que os resultados gerados pelo sistema são coerentes.

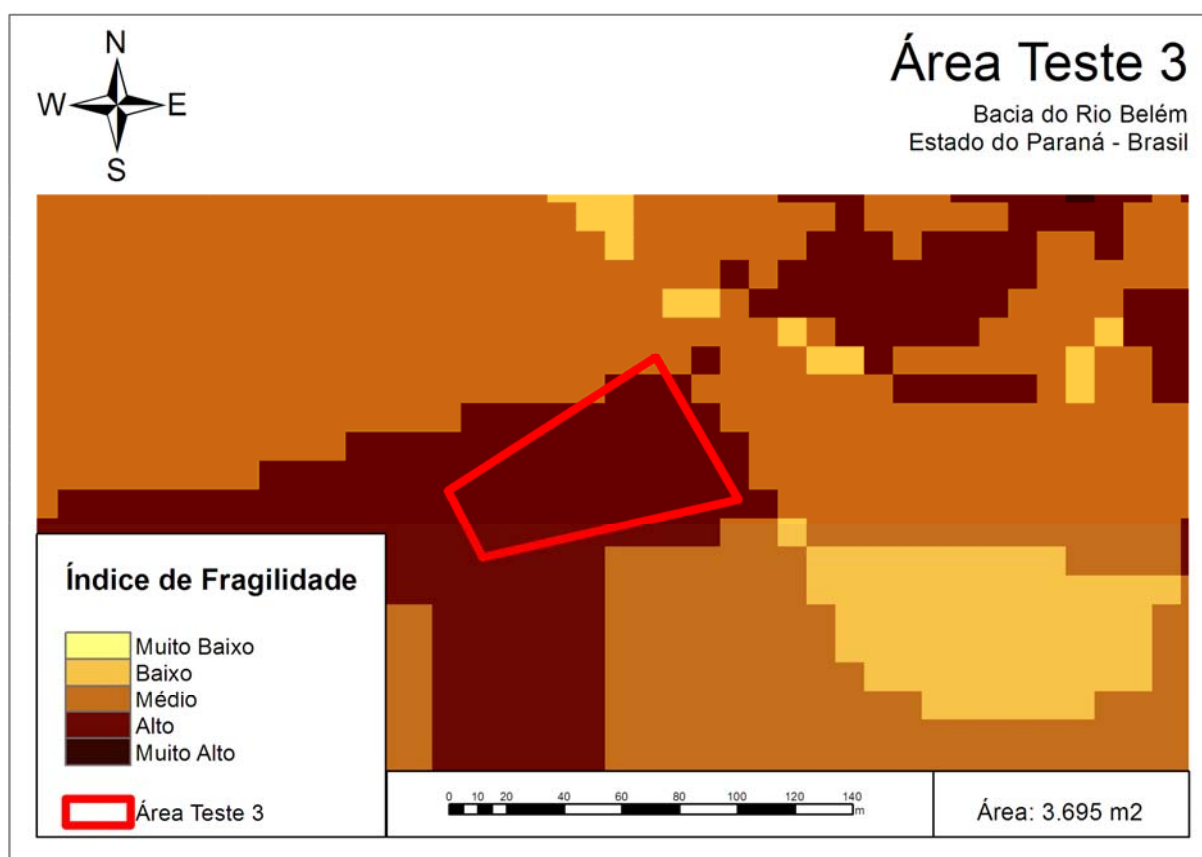


FIGURA 19 – ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DETERMINADO PELO MODELO IFA PARA A TESTE 03.

FONTE: AUTORA (2013)

Outra área analisa foi a Área Teste 6, a qual pode ser visualizada na Figura 20. Ela se localiza na Bacia Hidrográfica do Rio Iraí, localizada a nordeste da Região Metropolitana de Curitiba.

A área Teste 6 possui aproximadamente 18.720 m², é uma área densamente povoada. Existe intervenção humana em toda a área, como: construção de edificações e ruas.



Área Teste 06

Bacia do Rio Irai
Estado do Paraná - Brasil



FIGURA 20 – ÁREA TESTE 06.
FONTE: Autora (2013)

O índice de fragilidade obtido para a área Teste 6 não foi unânime entre os especialistas mais experientes. Sua classificação variou: muito baixo, baixo, médio e muito alto. Pode-se observar que 8,3% dos especialistas classificaram essa área como índice de fragilidade ambiental muito baixo, 50% como baixo, 16,7% como média e 25% como muito alto.

Os aspectos mais relevantes no processo de classificação segundo os especialistas foram a ação antrópica e o uso e ocupação do solo, sendo que o primeiro foi essencial para 58,3% dos especialistas e o segundo para 66,7% deles, como se observa na Figura 21.

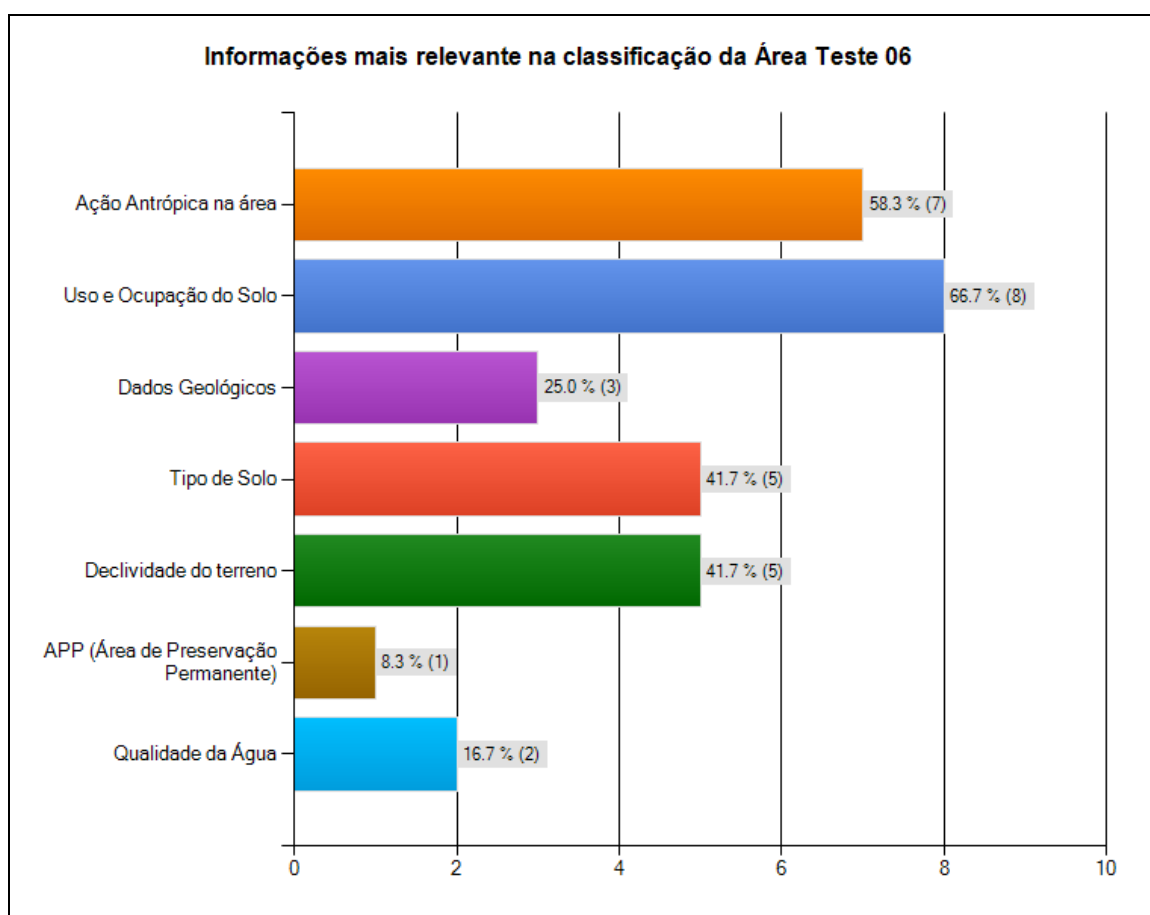


FIGURA 21 – CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIARAM NA CLASSIFICAÇÃO DA ÁREA TESTE 06 SEGUNDO ESPECIALISTAS EXPERIENTES.

FONTE: Autora (2013)

A modelagem IFA para a área associou o índice de fragilidade à área baixo, coincidindo com o índice associado pela maioria dos especialistas experientes. Eles justificaram sua opção por considerarem que o solo da região apresenta boa drenagem e associado à declividade baixa e a concentração de argila no solo, bem como sua compactação, fazem com que sejam pequenos os riscos associados à erosão. A fragilidade do meio é influenciada pela elevada urbanização e a ausência de vegetação da área. Os especialistas que consideraram o índice muito alto para a área ponderaram esses dois aspectos como os mais significativos na classificação.

Outra área avaliada com uma configuração distinta das anteriores foi a Área Teste 8, a qual se encontra na Bacia Hidrográfica do Rio Iraí, localizada a nordeste da Região Metropolitana de Curitiba. Essa área possui aproximadamente 185.643 m², a maior parte da área é utilizada para mineração, na qual existem alguns remanescentes de vegetação nativa da região e corpos de água, como se observa na Figura 22.



FIGURA 22 – ÁREA TESTE 08.
FONTE: Autora (2013)

Dentre os especialistas consultados a classificação da área Teste 8 variou de muito alto, alto e médio, sendo que os índices atribuídos representaram 58,3%, 25% e 16,7% respectivamente.

Os aspectos mais significativos citados pelos especialistas foram à declividade do terreno, a ação antrópica e o uso e ocupação do solo (Figura 23). Essa área apresenta declividade abrupta, de acordo com a metodologia utilizada, superior a 30%. A área também é utilizada para atividade de mineração o que pode gerar poluição dos corpos de água próximos.

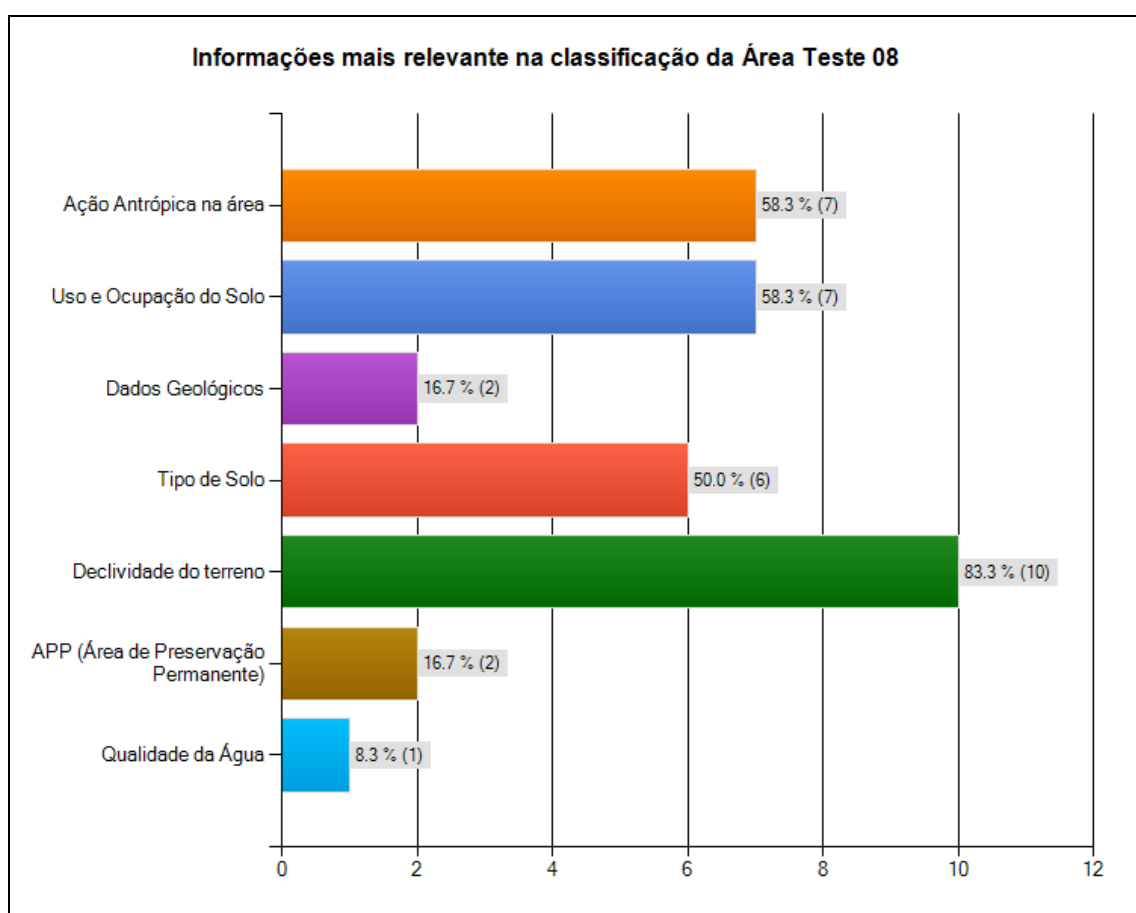


FIGURA 23 – CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIARAM NA CLASSIFICAÇÃO DA ÁREA TESTE 08 SEGUNDO ESPECIALISTAS EXPERIENTES.
FONTE: Autora (2013)

Na Figura 24, observa-se que a modelagem IFA foi satisfatória, pois associou a área o índice de fragilidade muito alto, coerente com o índice associado por especialistas experientes em análises ambientais.



Área Teste 08

Bacia do Rio Irai
Estado do Paraná - Brasil

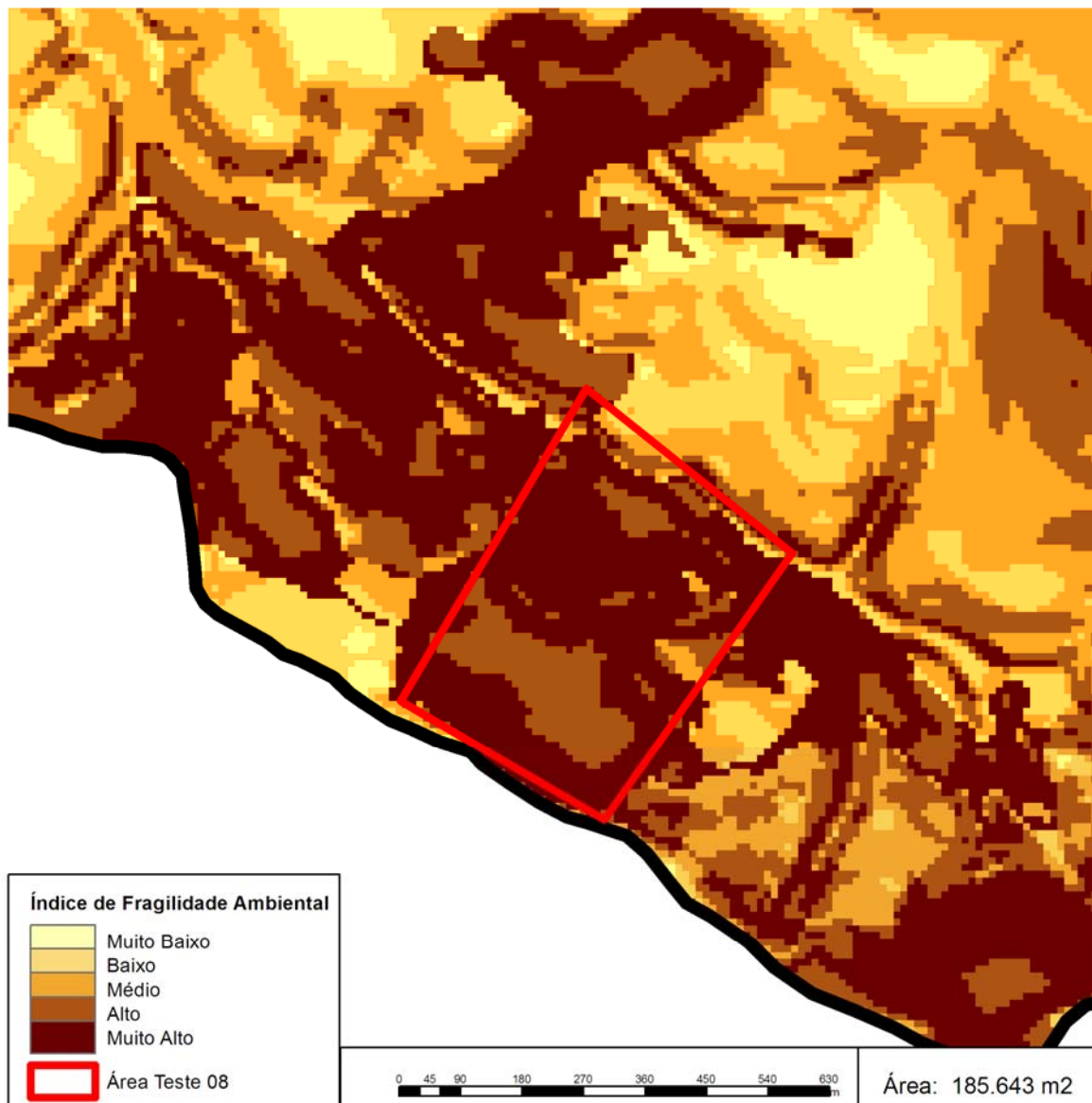


FIGURA 24 – ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DETERMINADO PELO MODELO IFA PARA A TESTE 08.

FONTE: Autora (2013)

4.2.2.1 Conclusões com relação ao uso do questionário

Com esse experimento foi possível verificar que a modelagem associou de forma coerente os índices de fragilidade ambiental para as doze áreas testadas. Em algumas situações a modelagem IFA não associou exatamente o mesmo índice que a maior parte dos especialistas, porém ele foi muito próximo, discrepante somente em uma classe. Verificou-se que as áreas de maior índice de fragilidade (alta e muito alta) associadas pelos especialistas também formam demarcadas pela modelagem IFA.

Constatou-se que o parâmetro solo, foi citado na grande maioria das análises e para todas as áreas teste. Diante desta constatação foi necessário fazer alguns testes de variações de ponderação no modelo IFA, aumentando o peso do parâmetro solo. Com essas análises pode-se observar que à medida que se aumentava a ponderação do parâmetro solo a modelagem tendia a generalizar um índice para áreas extensas. Esse fato é consequência dos dados disponibilizados pelos órgãos oficiais que utiliza pequenas escalas e generaliza áreas extensas, além dos dados serem interpolados a partir de dados de diversas épocas. Desta forma, preferiu-se manter a ponderação do solo baixa, permitindo a delimitação de áreas de forma mais detalhada; como citado anteriormente, áreas de fragilidade alta, favorecendo a utilização dos resultados, por órgãos gestores de políticas públicas. A geração de um índice único de fragilidade para uma bacia hidrográfica, por exemplo, se esse for um índice alto ou muito alto, somente indica que existem problemas sérios dentro da bacia, mas não discrimina a localização dos focos dos problemas.

4.2.3 Comparação entre diferentes modelos existentes

Nesta seção são apresentados os resultados referentes à comparação do modelo para determinação dos índices de fragilidade ambiental desenvolvido com os modelos consagrados de Ross e Crepani.

4.2.3.1 Bacia Hidrográfica do Rio Belém

O índice de fragilidade médio para a Bacia do Rio Belém diverge entre o Ross e IFA, assim como entre Crepani e IFA como pode-se verificar no Quadro 19. O índice entre as classes distintas evidencia ainda mais essa situação, por exemplo, para o índice muito alto, o modelo de Crepani e IFA classificam menos de 5% da área total da bacia nessa classe, já o modelo de Ross classifica 20%. Para o índice médio as percentagens são ainda mais díspares, menos de 1%, 15% e 50%, consecutivamente para os modelos de Ross, Crepani e IFA.

Modelo	Índice de Fragilidade para a Bacia do Rio Belém					Índice Médio de Fragilidade da Bacia
	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	
ROSS	0,16%	24,61%	0,79%	52,51%	19,79%	Alto
CREPANI	0,10%	30,25%	14,99%	51,38%	1,23%	Alto
IFA	0,95%	18,93%	50,28%	22,80%	4,75%	Médio

QUADRO 19 – AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM ÁREA EM CADA CLASSE E ÍNDICE MÉDIO DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO BELÉM.

FONTE: Autora, 2013.

Essa situação faz surgir o questionamento, será que os modelos não conseguem delimitar as áreas com maior nível de fragilidade? Será que esses modelos são úteis para as políticas de planejamento e gestão ambiental? Mas qual a distribuição desses índices? Essas questões podem ficar mais claras quando se observa a Figura 25, nela percebe-se que realmente os modelos aplicados diferem para uma mesma área. O modelo de Crepani é bastante generalista, ele delimita o índice de fragilidade para grandes áreas. Já o modelo de Ross evidencia áreas específicas e o modelo desenvolvido nessa pesquisa é ainda mais detalhista porque enfatiza pequenas áreas. No entanto, pode-se perceber que as áreas que possuem índice de fragilidade alto são demarcadas nas mesmas regiões nos modelos três modelos. As divergências entre os modelos são resultantes das variáveis analisadas e das ponderações de cada uma delas. As áreas mais frágeis são demarcadas, o que varia de um modelo para outro é o nível de detalhamento, como se observa na Figura 25. No modelo Ross e Crepani as áreas são generalizadas, já no modelo IFA, a consideração de áreas de APP e ação antrópica consegue discriminar áreas de maior fragilidade, desconsiderando regiões de menor fragilidade, mesmo localizada próxima a áreas muito frágeis. Isso é verificado para toda a bacia, os mapas

temáticos com a representação da Bacia do Rio Belém com os três modelos encontram-se no Apêndice 8.5.

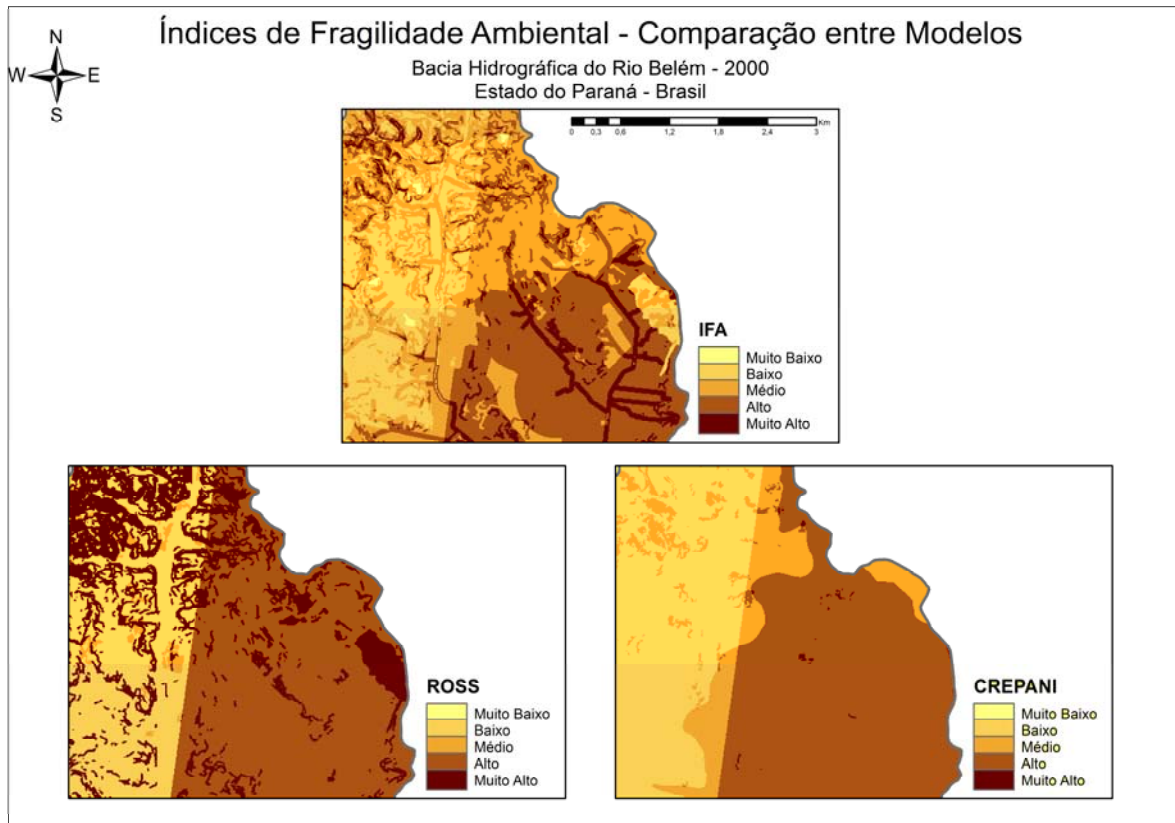


FIGURA 25 – DETALHE DA BACIA DO RIO BELÉM DIFERENTES MODELOS.
FONTE: Autora (2013)

Visando provar tal tese calcularam-se as estatísticas para o conjunto das imagens resultantes dos três modelos. Para tal, gerou-se a matriz Variância-Covariância (MVC), para a verificação dos coeficientes de correlação entre a combinação de dois modelos. Para o cálculo da relação entre os dois conjuntos de dados se utilizou a fórmula (5.3.1.2)

$$Cov_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (Z_{ik} - \mu_i) * (Z_{jk} - \mu_j)}{N-1} \quad (4.3.1.1)$$

$$Corr_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j} \quad (4.3.1.2)$$

Onde,

Z - valor da célula

i, j - são camadas de uma linha e coluna

μ - é a média de modelo

N - é o número de células

k - denota uma determinada célula

δ - desvio-padrão

A matriz de correlação mostra os valores dos coeficientes de correlação que representam a relação entre os conjuntos de dados. Ela é a proporção da covariância entre as duas células divididas pelo produto dos respectivos desvios-padrão.

O resultado é um número adimensional, que varia de 1 a -1, sendo que 1 indica uma relação direta entre os dois modelos, ou seja, quando os valores das células de um modelo aumentam, os valores das células do outro modelo também tendem a aumentar. E o valor -1 indica que um modelo é inverso ao outro, que quando uma variável aumenta num modelo diminui no outro. E quanto mais o valor fica próximo a zero isso representa que os modelos são independentes.

Dessa forma, no Quadro 20, observa-se que os modelos são diretamente correlacionados. Eles possuem uma correlação alta, sendo entre o modelo desenvolvido e o de Ross igual a 0,919 e com o modelo de Crepani é de 0,929.

Modelo	Ross	Crepani	IFA
Ross	1,000	0,943	0,919
Crepani	0,943	1,000	0,929
IFA	0,919	0,929	1,000

QUADRO 20 – AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM ÁREA EM CADA CLASSE E ÍNDICE MÉDIO DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO BELÉM.

FONTE: Autora, 2013.

4.2.3.2 Bacia Hidrográfica do Rio Cotia

Assim como para a bacia do Rio Belém, o índice médio de fragilidade, para a Bacia do Rio Cotia, é diferente entre os três modelos testados, como pode se verificar no Quadro 21. Observa-se que a área da bacia considerada nessa classe

utilizando o modelo de Crepani e IFA representam menos de 10% da área total da bacia e para o modelo de Ross 24,81%. Para o índice muito alto percebe-se claramente a disparidade de classificação sendo as percentagens entre os modelos iguais a, 14,11%, 23,20% e 43,54%, para os modelos de Ross, Crepani e IFA, respectivamente.

Modelo	Índice de Fragilidade para a Bacia do Rio Belém					Índice Médio de Fragilidade da Bacia
	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	
ROSS	24,81%	27,27%	19,38%	14,49%	14,11%	Baixo
CREPANI	0,06%	15,23%	27,76%	33,87%	23,20%	Alto
IFA	6,75%	15,35%	20,98%	13,37%	43,54%	Muito Alto

QUADRO 21 – AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM ÁREA EM CADA CLASSE E ÍNDICE MÉDIO DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO COTIA.

FONTE: Autora, 2013.

A falta de correlação entre os modelos se confirma quando se analisa a matriz Variância-Covariância (Quadro 22). Percebe-se que a correlação entre os modelos é muito baixa, por exemplo, entre ROSS e IFA é de 0,432 e entre Crepani e IFA é de apenas 0,651.

Modelo	Ross	Crepani	IFA
Ross	1,000	0,342	0,432
Crepani	0,342	1,000	0,651
IFA	0,432	0,651	1,000

QUADRO 22 – AVALIAÇÃO CORRELAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO COTIA.

FONTE: Autora, 2013.

No entanto, ao realizar-se uma análise visual entre os modelos, observa-se que o modelo desenvolvido nesta pesquisa mapea as áreas de índices de fragilidade mais altos que de uma forma generalista são delimitadas tanto no modelo de Ross quanto no de Crepani. Observa-se na Figura 26, que o modelo de Ross mapeia as áreas de maior fragilidade ao sul da bacia, o modelo de Crepani ao norte, e o modelo IFA delimita essas áreas em toda a bacia.

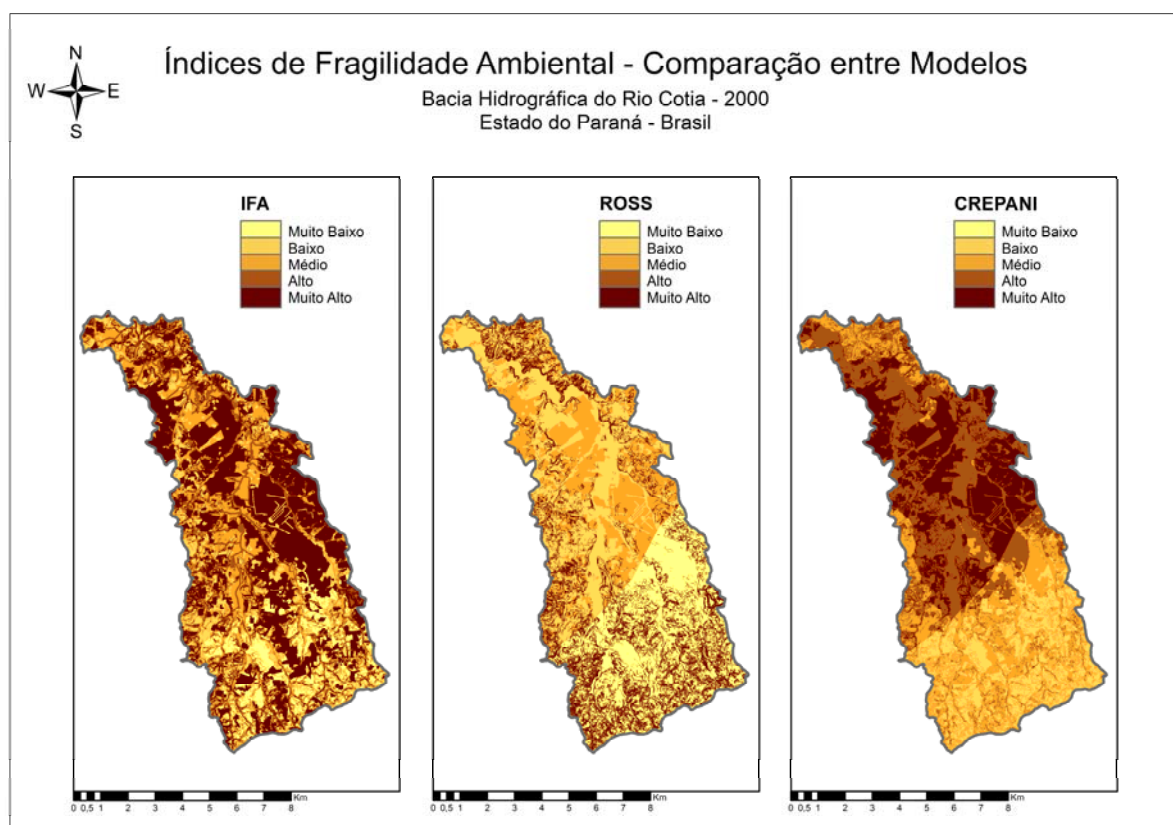


FIGURA 26 – COMPARAÇÃO DA BACIA DO RIO COTIA COM DIFERENTES MODELOS.
FONTE: Autora (2013)

4.2.3.3 Bacia Hidrográfica do Rio Iraí

Na Bacia do Rio Iraí o índice médio de fragilidade ambiental da bacia é similar quando se utiliza tanto o modelo de Crepani quanto o de Ross, destoando para o modelo desenvolvido nesta pesquisa (Quadro 23). Sendo que as maiores diferenças são encontradas na classe baixo e médio.

Modelo	Índice de Fragilidade para a Bacia do Rio Belém					Índice Médio de Fragilidade da Bacia
	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	
ROSS	10,10%	7,57%	43,81%	21,17%	17,35%	Médio
CREPANI	0,00%	6,92%	69,43%	22,91%	0,75%	Médio
IFA	6,33%	38,60%	29,67%	15,20%	10,15%	Baixo

QUADRO 23 – AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM ÁREA EM CADA CLASSE E ÍNDICE MÉDIO DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ.

FONTE: Autora, 2013.

Ao se verificar a correlação entre os modelos através da matriz Variância-Covariância (Quadro 24), observa-se que a correlação entre os modelos ROSS e IFA é de 0,86 e entre Crepani e IFA é de 0,92.

Modelo	Ross	Crepani	IFA
Ross	1,000	0,901	0,860
Crepani	0,901	1,000	0,924
IFA	0,860	0,924	1,000

QUADRO 24 – AVALIAÇÃO CORRELAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ.

FONTE: Autora, 2013.

No entanto, ao se analisar os mapas de índices de fragilidade ambiental gerados por cada modelo percebe-se que o de Ross e de Crepani destoam entre si, o que já foi comprovado anteriormente pela pesquisa de Sporn (2007). Já o modelo desenvolvido não se assemelha inteiramente a nenhum dos anteriores, porém destaca áreas de maior fragilidade ambiental existentes nos modelos de Ross e Crepani, como se verifica na Figura 27.

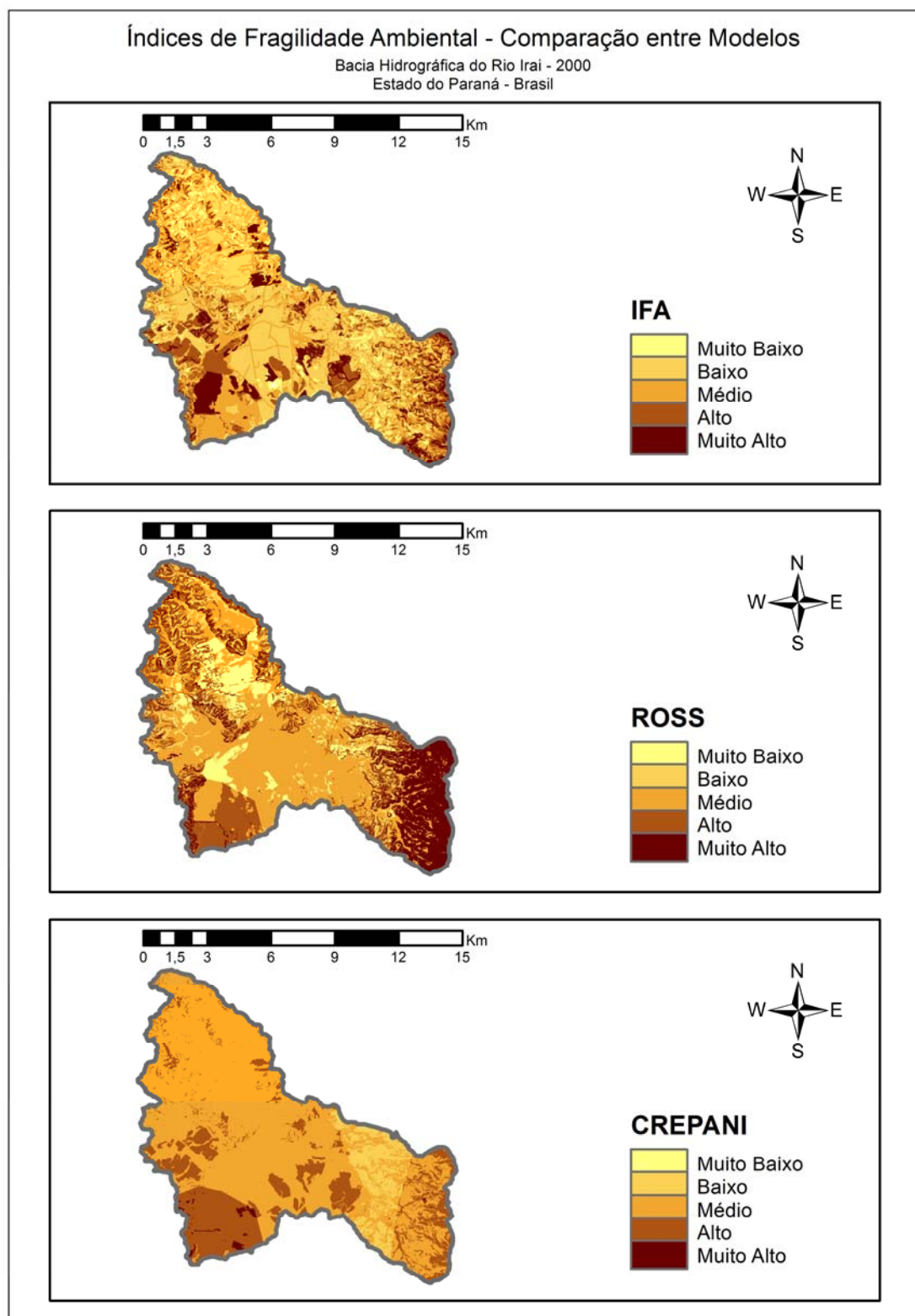


FIGURA 27 – COMPARAÇÃO DA BACIA DO RIO IRAÍ COM DIFERENTES MODELOS.
FONTE: Autora (2013)

4.2.3.4 Conclusões com relação aos diferentes modelos existentes

A comparação dos modelos de Ross e Crepani com a modelagem IFA utilizando três bacias hidrográficas com características distintas foi essencial para verificar a validade da modelagem desenvolvida. Percebeu-se que mesmo nas situações em que os resultados da matriz Variância-Covariância (MVC) apresentaram baixos coeficientes de correlação entre o modelo IFA e Ross ou IFA e Crepani essa correlação entre os modelos Ross e Crepani também era baixa. Porém, ao se realizar uma análise visual dos resultados das três modelagens para uma única bacia, nota-se que o modelo IFA não poderia mesmo apresentar coeficientes mais altos, já que esse modelo consegue realizar uma junção parcial dos resultados dos outros dois modelos.

Analizando os resultados dos mapas temáticos dos modelos Ross e Crepani percebe-se que esses atribuem índices de fragilidade maiores que o modelo IFA, esse último consegue delimitar áreas com índices de fragilidade alto e muito alto de maneira bem mais pontual. As características do modelo IFA faz com que essa modelagem possa ser aplicada a estudos de políticas de planejamento e gestão pública para verificar sua eficiência, pois com áreas melhor delimitadas é possível propor planos, programas e diretrizes baseadas nas reais necessidades de determinada região, não desperdiçando recursos e fazendo com que essas sejam mais efetivas.

Constatou-se também que bacias que apresentam variações bruscas no relevo apresentam maior correlação entre os modelos Ross e IFA, pois em ambas as modelagens o parâmetro relevo possui uma ponderação alta. Porém, o modelo Ross generaliza o índice de fragilidade para as áreas com índice de declividade alto e muito alto. Nas áreas das bacias nas quais o relevo é mais plano a correlação entre os três modelos aumenta consideravelmente, pois novamente o parâmetro relevo é o que mais influencia as modelagens Ross e IFA, levando os índices para níveis mais baixos. No entanto, o modelo Ross e Crepani mantém a características de generalização do modelo para essas áreas.

4.2.4 Contribuição de cada critério para determinação de índices de fragilidade ambiental

Nesta seção são apresentados os resultados da contribuição de cada um dos critérios para determinação de índices de fragilidade ambiental para a Bacia do Rio Belém, Rio Iraí e Rio Cotia.

Para esse experimento, inicialmente gerou-se uma imagem dos índices de fragilidade, com todos os parâmetros propostos no modelo, para as três bacias. Essas foram usadas como padrão para comparação com as imagens geradas com ausência de algum parâmetro. Para a geração de cada uma das outras imagens considerou-se que não havia informação disponível de um ou mais dados utilizados como parâmetro no modelo.

Dentro deste contexto, para cada bacia gerou-se um total de dez imagens do índice de fragilidade. Para esses três conjuntos de imagens foram determinados os coeficientes de correlação entre cada imagem com ausência de um parâmetro com o padrão de comparação. Essa correlação é apresentada através da matriz Variância-Covariância (MVC), de um mapa temático contendo as três imagens de um detalhe de cada bacia, assim como com um gráfico comparativo das classes de fragilidade em todas as imagens. Nas tabelas as imagens de determinação de índices de fragilidade ambiental foram renomeadas da seguinte forma:

Sendo:

Layer 1 – Modelo completo;

Layer 2 – Modelo sem informação de declividade

Layer 3 – Modelo sem informação de Cobertura Vegetal

Layer 4 – Modelo sem informação de APP

Layer 5 – Modelo sem informação de Antrópica

Layer 6 – Modelo sem informação de Antrópica e APP

Layer 7 – Modelo sem informação de Rocha

Layer 8 – Modelo sem informação de Solo

Layer 9 – Modelo sem informação de Clima

Layer 10 – Modelo sem informação de rocha, clima, solo

4.2.4.1 Bacia Hidrográfica do Rio Belém

No Quadro 25 têm-se os valores das estatísticas do conjunto de imagens geradas para a Bacia Hidrográfica do Rio Belém a partir do modelo IFA utilizando a variação de parâmetros de entrada.

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,000	0,828	0,804	0,685	0,361	0,253	0,801	0,797	0,880	0,753

QUADRO 25 – VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA DA MODELAGEM DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO BELÉM COM VARIAÇÃO DA ENTRADA DE PARÂMETROS.
FONTE: Autora, 2013.

Da análise Variância-Covariância (MVC) do Quadro 25, percebe-se a correlação com o padrão, modelo completo, é menor (0,685; 0,361; 0,253) quando há ausência de entrada de dados de APP, antrópicos ou os dois. E a correlação é maior (0,880) para imagens sem a entrada de dados de Clima. Isso fica evidente quando se observar a Figura 28. A análise visual revela as diferenças que são causadas na classificação das áreas em diferentes índices tanto quantitativamente quanto geometricamente. Na Figura 28, também pode se observar que em algumas áreas específicas, mesmo a correlação espacial entre os dados permanecendo alta com a ausência do parâmetro relevo, haverá discrepâncias bruscas com relação ao modelo completo.

A entrada de todos os parâmetros permite a classificação detalhada das áreas de maior fragilidade dentro da bacia, a ausência de qualquer um desses parâmetros tende a classificar as áreas com índices menores de fragilidade, por exemplo, regiões classificadas com índice de fragilidade muito alto no modelo completo podem ser classificadas como médias ou baixas com a falta de um único parâmetro.

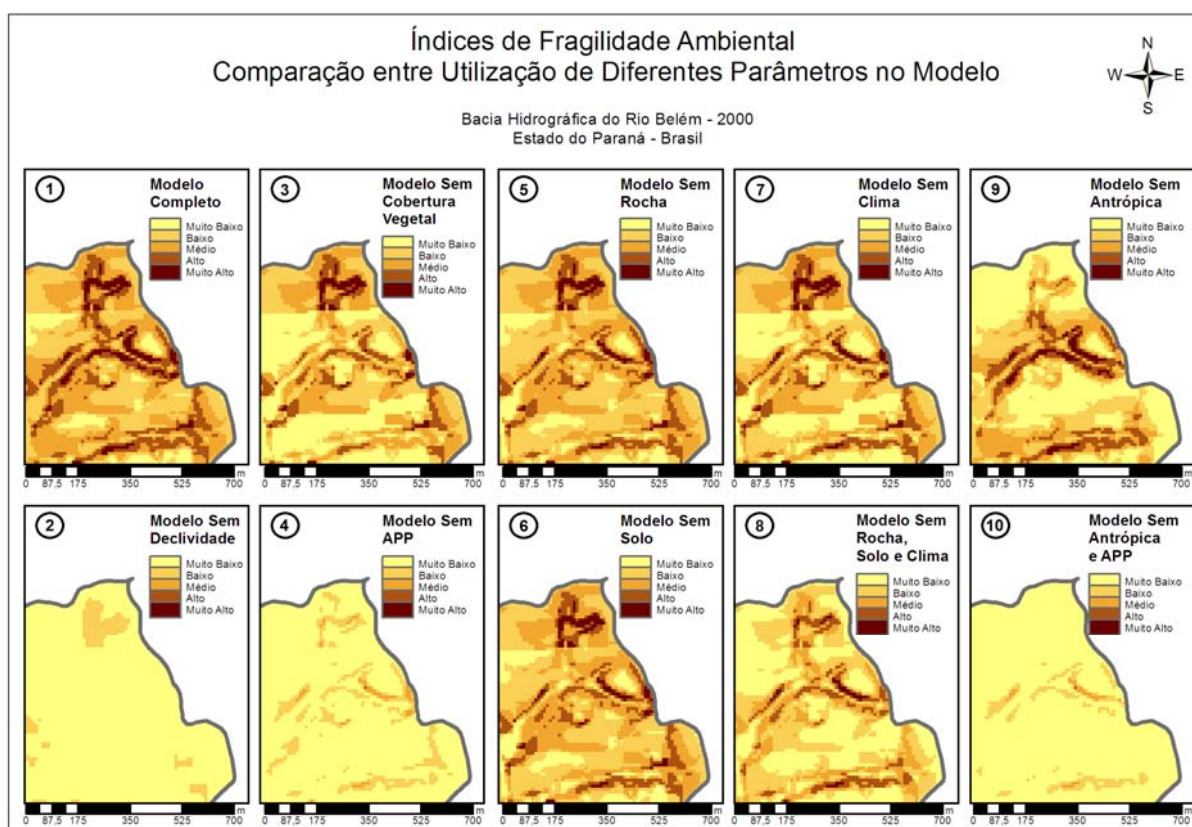


FIGURA 28 – APLICAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS PARA A GERAÇÃO DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO BELÉM.
FONTE: Autora (2013)

4.2.4.2 Bacia Hidrográfica do Rio Cotia

A matriz Variância-Covariância (Quadro 26) apresenta os valores das estatísticas do conjunto de imagens geradas para a Bacia Hidrográfica do Rio Cotia a partir do modelo desenvolvido utilizando a variação de parâmetros de entrada. Percebe-se que primeiramente a menor correlação com o modelo completo ocorre na falta do parâmetro cobertura vegetal (0,412), e depois com os parâmetros Antrópica e APP (0,740).

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,000	0,811	0,412	0,868	0,923	0,740	0,957	0,932	0,988	0,926

QUADRO 26 – VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA DA MODELAGEM DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ COM VARIAÇÃO DA ENTRADA DE PARÂMETROS.
FONTE: Autora, 2013.

Na Figura 29, pode-se observar que os parâmetros com menor correlação com o modelo completo apresentam a delimitação das áreas de fragilidade bastante dispares do padrão. No entanto, também se percebe que modelos com a ausência de parâmetros que na matriz MVC são altamente correlacionados geram áreas de fragilidade distantes do padrão, como, por exemplo, o modelo sem declividade. E da mesma forma que para as outras bacias testadas percebe-se a classificação é mais refinada com a entrada de todos os parâmetros, as áreas de maior fragilidade dentro da bacia são bem definidas, e a ausência de qualquer parâmetro classifica as áreas com índices menores de fragilidade e de forma mais generalista.

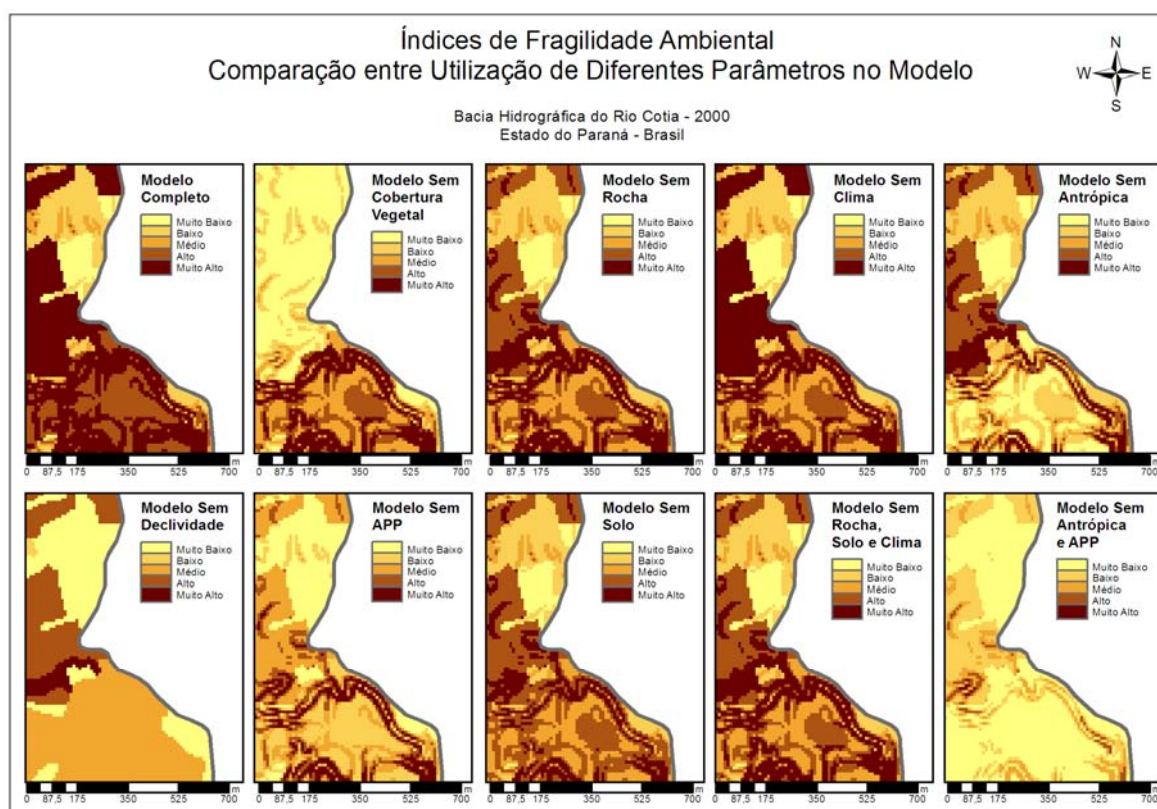


FIGURA 29 – APLICAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS, PARA A GERAÇÃO DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO COTIA.
FONTE: Autora (2013)

4.2.4.3 Bacia Hidrográfica do Rio Iraí

A matriz Variância-Covariância (MVC) do conjunto de imagens geradas para a Bacia Hidrográfica do Rio Iraí é apresentada no Quadro 27. Constatase que se obtiveram coeficientes de correlação significativos (0,935; 0,928; 0,924 e 0,907) na ausência de um dos parâmetros como solo, clima, rochas ou dos três. Porém, na falta de dados advindo da cobertura vegetal, áreas de APP, uso antrópico e declividade a correlação é mais baixa (0,592; 0,697; 0,794 e 0,715).

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,000	0,715	0,592	0,697	0,794	0,676	0,907	0,935	0,924	0,928

QUADRO 27 – VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA DA MODELAGEM DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ COM VARIAÇÃO DA ENTRADA DE PARÂMETROS.

FONTE: Autora, 2013.

Observa-se na Figura 30, uma correspondência entre os mapas temáticos gerados com diferentes parâmetros de entrada. Constatase que a ausência de somente um tipo de dado pode fazer com que a classificação dos índices de fragilidade da área possa diferir muito, por exemplo, o padrão (Modelo Completo) com o mapa gerado sem o dado de APP, áreas classificadas no primeiro como alto índice de fragilidade ambiental desaparecem no segundo modelo.

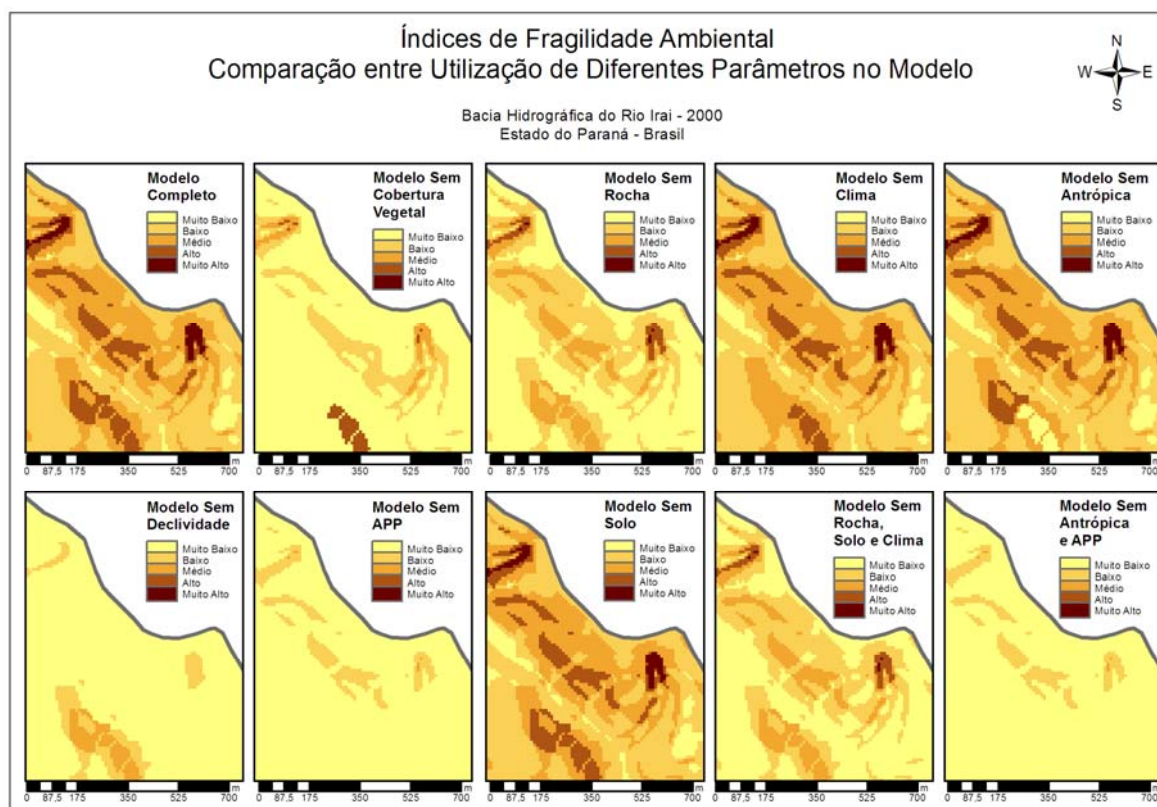


FIGURA 30 – APLICAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS, PARA A GERAÇÃO DO ÍNDICE DE FRAGILIDADE DA BACIA DO RIO IRAÍ.
FONTE: Autora (2013)

4.2.4.4 Conclusões correlacionadas com a contribuição de cada critério na modelagem

Percebe-se que a ausência de qualquer parâmetro tende a diminuir os índices de fragilidade para níveis mais baixos e a generalizar as áreas numa mesma classe.

Observou-se que a ausência das características, distintas e predominantes das bacias, como declividade ou ocupação urbana, que são representadas na modelagem pelos parâmetros, influencia diretamente na diminuição da correlação com o modelo completo. Por exemplo, a bacia do Rio Belém, que é caracterizada por possuir alto índice de ocupação urbana e uma série de corpos de água, quando é modelada e com ausência desses parâmetros, o modelo IFA não consegue delimitar as áreas de maior índice de fragilidade. Isso faz sentido, pois estes fatores são relevantes para essa bacia. Já para a bacia do Rio Iraí e do Rio Cotia a ausência do parâmetro ocupação urbana não é relevante, pois nessas bacias a ocupação urbana menor, comparada ao do Rio Belém. Já para esses casos é mais

coerente que a ausência do parâmetro cobertura vegetal não permita a delimitação das áreas de fragilidade, considerando que essas bacias possuem aproximadamente 50% da sua mata ciliar remanescente.

Constatou-se também que a omissão do parâmetro clima não gerou diferenças significativas na modelagem em nenhuma das três bacias. Isso porque é um parâmetro constante em todas elas, e, além disso, pela região apresentar uma média anual de pluviosidade de 1.400 mm, e o clima subtropical mesotérmico úmido, classificado o clima com índice de fragilidade baixo, o parâmetro não foi significativo na modelagem IFA. Com essa verificação percebeu-se que a avaliação desse parâmetro seria mais relevante na comparação com bacias de regiões diferentes, com clima diferente, e principalmente áreas que apresentassem uma situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500 mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900 mm/ano (semiárido). Dessa forma se poderia chegar a conclusões mais válidas sobre esse parâmetro, pois nessa situação o índice de fragilidade do clima seria classificado como muito alto.

Outra constatação intrigante diz respeito ao parâmetro solo, nas Seções 5.1 e 5.2, esse parâmetro foi um dos mais citados pelos especialistas na especificação dos índices de fragilidade, porém a ausência na modelagem não foi tão relevante quanto as APPs e a declividade. Parte disso se deve a diferença das ponderações destes parâmetros, porém o motivo mais significativo foi o discutido na Seção 4.2.2.1, na qual comentou que testes que associaram maior peso a esse do parâmetro na modelagem geram generalização associada ao índice de fragilidade para a bacia, Impedindo a delimitação de áreas de forma mais detalhada. E isso é consequência da escala de dados disponíveis no país, porém a partir do momento que as áreas de análise possuam um maior detalhamento dos mapeamentos de solo da região é possível aumentar a ponderação do parâmetro solo sem que haja generalização na demarcação das áreas.

4.2.5 Respostas das variações de escala de dados no modelo

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a variação da resolução dos dados. O experimento parte da geração de um mapa de fragilidade ambiental com dados de entrada na modelagem com 10 metros de resolução espacial, posteriormente gera-se mapas com entradas de dados com resoluções mais baixas. Esse experimento foi realizado para verificar a possibilidade de utilização de dados de diferentes escalas e a consequência de dados de menor resolução nos resultados gerados pela modelagem. Visando atingir tal objetivo os dados foram degradados de 5 metros a cada entrada, ou seja, a primeira entrada com 10m, a seguinte com 15m e assim por diante, até chegar-se a 100m. Cada entrada de dados gerou uma saída com a resolução de entrada do dado, com a classificação dos índices de fragilidade para a Bacia do Rio Iraí, como pode ser observado na Figura 31.

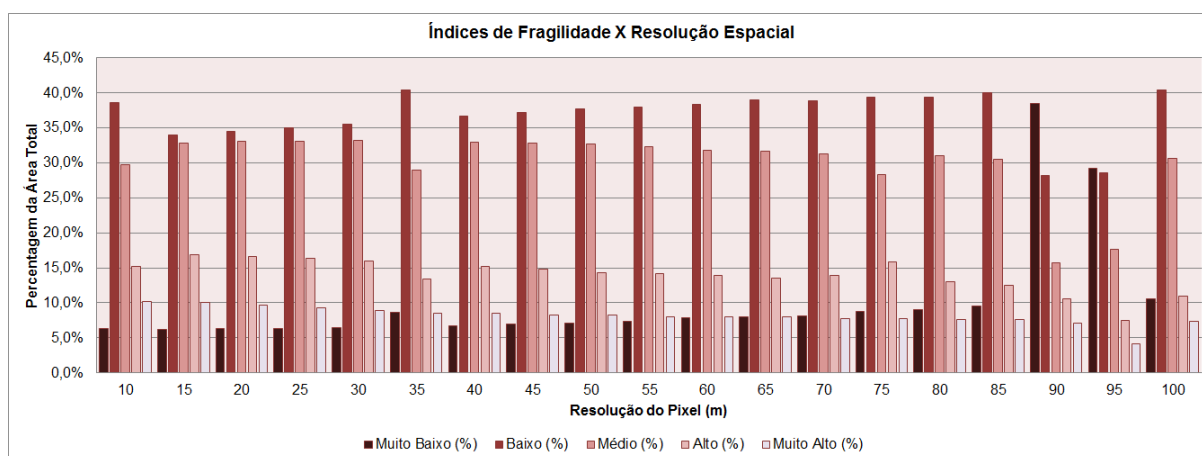


FIGURA 31 – VARIAÇÃO DOS ÍNDICES DE FRAGILIDADE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS DADOS.

FONTE: Autora (2013)

Percebe-se que à medida que os dados de entrada no modelo são degradados as classes com índices muito altos de fragilidade ambiental tendem a diminuir e as áreas de muito baixo a aumentar ou a díspar da tendência (Figura 32). A linha de tendência representa o padrão de comportamento da classificação com a variação da resolução espacial. Pode-se observar que a variação na percentagem de dados para a resolução, para o melhor caso, pixels de 10m a quantidade da classe muito baixa representa 6,3%, enquanto que no pior caso (pixels=90m) esta

mesma classe teve 38% do total de pixels. Com a resolução de 90m e 95m a classificação de dados desvia-se da tendência dos dados. Nas classes baixo e médio, não há variações significativas com a variação da resolução, a classificação se mantém muito próxima ao valor médio, com exceção da resolução de 90m e 95m. Para a classe médio, para o caso do pixel de 10 m de resolução, esse representa 29,7% do total da área da bacia, já para o caso que o pixel possui 90m de resolução esse percentual da área total passa para 15,7%, e quando se utiliza 100m de resolução volta a apresentar 30,6%. Para a classe Alto a classificação dos dados começa a dispar da tendência a partir de 70m de resolução, e a variação da resolução é significativa, pois os valores de percentagem da classe com relação a área total da bacia tendem a diminuir com a diminuição da resolução. A classe de índice de fragilidade muito alto apresenta comportamento similar a classe alto, sendo que a percentagem de pixels classificadas nessa classe diminui com a diminuição da resolução.



FIGURA 32 – TÊNDECIA E VARIAÇÃO MÉDIA DOS DADOS.
FONTE: Autora (2013)

A variação na resolução dos dados gera alterações geométricas na delimitação das classes de índice de fragilidade, consequentemente mudanças quantitativas e qualitativas, como se verifica na Figura 33. Quanto maior a resolução espacial mais refinada a delimitação para uma determinada área. Consegue-se perceber o detalhamento em função das feições espaciais como o relevo e as áreas de APP, à medida que a resolução vai diminuindo não é mas possível discriminar essas feições.

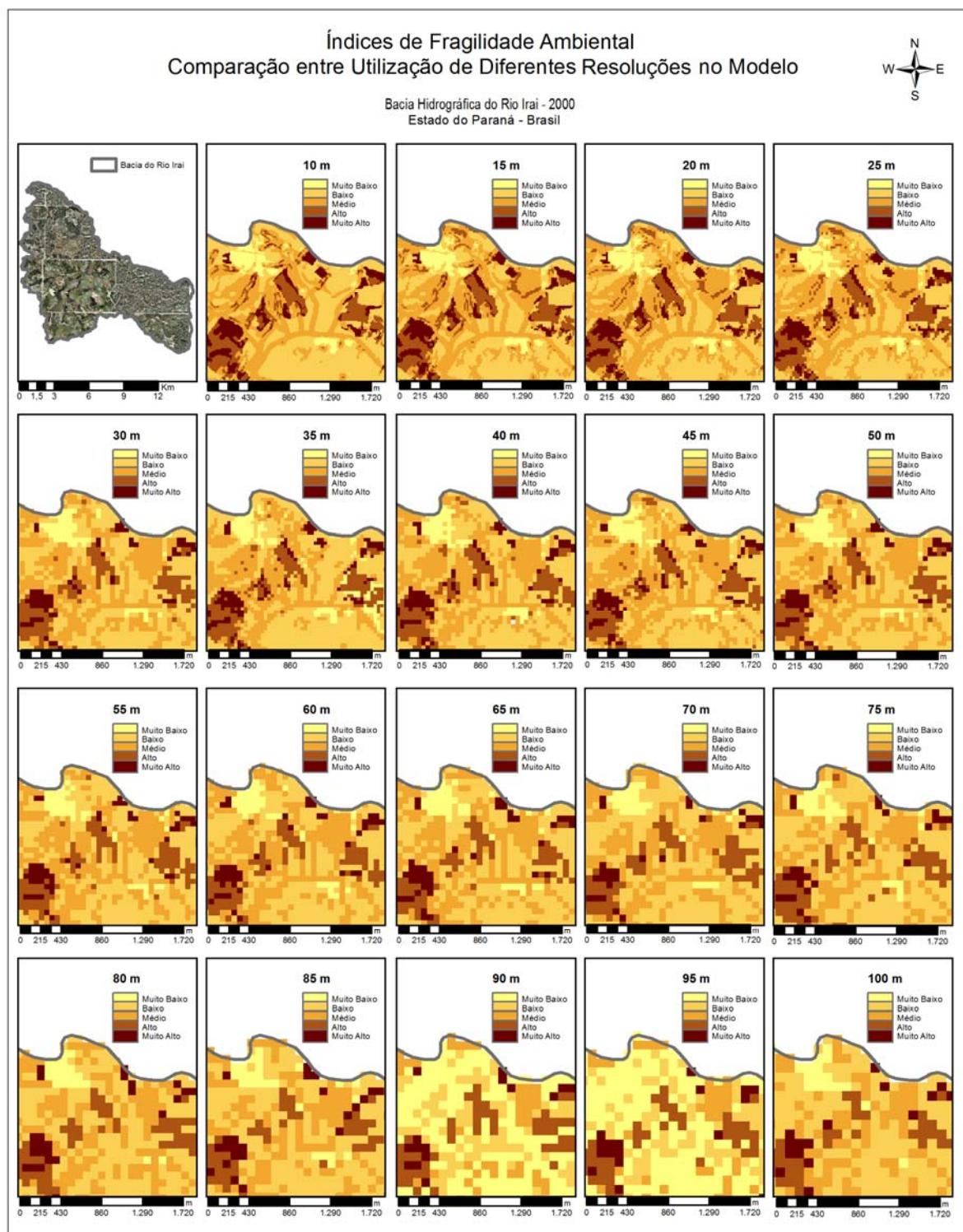


FIGURA 33 – DETALHE DA BACIA DO RIO IRAÍ UTILIZANDO VARIAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DOS DADOS.
FONTE: Autora (2013)

4.2.5.1 Conclusões correlacionadas quanto às variações de escala de dados no modelo

Avaliando as variações de escala no modelo percebe-se que à medida que se degrada os dados, há um menor detalhamento das áreas de maior índice de fragilidade, porém essa perda de informação só é significativa a partir de 50 metros de resolução. Quando a resolução é superior a 50 metros percebe-se que as classes intermediárias entre índice de fragilidade muito alto e muito baixo tendem a desaparecer e as áreas de índice de fragilidade muito alto, mesmo ainda sendo demarcadas, sofrem perdas significativas.

Conclui-se que os dados com resolução de 10 metros mapeiam os índices de fragilidade dentro da bacia de forma detalhada e que dados com uma resolução de até 50 metros ainda podem ser utilizados discriminando as áreas de fragilidade ambiental alto e muito alto com eficiência, o que permite que sejam utilizados dados em escala de 1:10.000 até 1:100.000. No Brasil, dados (dados altimétricos, mapas geológicos, mapas de solo), em escala 1:100.000, são ofertados de modo gratuito por vários órgãos públicos como, por exemplo, em escala nacional o IBGE (<http://www.ibge.gov.br/home/download/geociencias.shtm>), e em escala regional para o Paraná, o Instituto Águas do Paraná (<http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=78>).

É importante destacar que, com essa constatação, percebe-se que é possível utilizar dados de sensores como LandSat e CBERS que são distribuídos gratuitamente pelo site do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) ou imagens do sensor SPOT, para atualizar parâmetros de ação antrópica, cobertura vegetal e APP. Os dados do sensor Landsat TM possuem resolução espacial de 30x30m, e são disponibilizados dados desde 1984, suas bandas permitem, segundo Jesen (2009), discriminação de tipos e vigor de vegetação, medidas de umidade de plantas e solo, ou seja, fornece suporte para análises de uso da terra, solo e características da vegetação. O sensor CBERS nasceu de uma parceria inédita entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial (INPE, 2012) em 1999. Esse sensor possui uma resolução espacial de 20 metros em quatro bandas espectrais, mais uma pancromática. As imagens obtidas com ele são utilizadas na identificação de áreas de florestas, campos agrícolas, mapeamento de uso do solo, expansões urbanas, apoio a levantamentos de solos e geológicos. Já o sensor SPOT, disponibiliza

imagens com resolução de 2,5m a 20m, desde 1986, é um sistema francês desenvolvido francês, pelo *Centre National d'Études Spatiales* (CNES) com apoio da Suécia e Bélgica. Seus dados são utilizados para mapear o uso e a cobertura das terras, para estudo, monitoramento, previsão e manejo de recursos naturais e atividades antrópicas.

A possibilidade do uso das imagens, dos sensores LandSat, CBERS e SPOT, para a análise de índices de fragilidade ambiental permite estudos e planejamento de áreas mais vastas e a custo mais baixo, do que se utilizar imagens de alta resolução, o que facilita a aquisição por órgãos públicos e a real probabilidade de geração de subsídios para a tomada de decisões. Além disso, devido à disponibilização de imagens de várias épocas pode-se classificar o uso do solo para épocas distintas e modelar os índices de fragilidade para cada época. E assim é possível realizar análises temporais da variação das áreas de fragilidade e avaliar a degradação e aumento da ação antrópica no decorrer do tempo e verificar tendências para os fenômenos mapeados.

4.2.6 QUESTÕES RELACIONADAS À QUALIDADE DOS DADOS

Na seção 2.7, realizou-se uma discussão correlacionada à qualidade dos dados espaciais e a necessidade do conhecimento da qualidade com que as análises sobre esses dados são geradas. Nesta seção é discutido a influência da acurácia, do erro de precisão e resolução na determinação de índices de fragilidade ambiental.

No decorrer do desenvolvimento dessa pesquisa foram utilizados dados em diferentes escalas, o que significa trabalhar com dados com resoluções diferentes e precisão de dados diferentes. Por exemplo, os dados de solo utilizados na modelagem eram de 1:20.000, ou seja, a porção detectável em metros no terreno seria de 20 m, porém não existe qualquer outra informação intrínseca sobre esse dado, por exemplo, como ele foi gerado? Houve interpolação de dados para a geração do mapa temático? Qual a precisão desse dado?

Essas questões são fundamentais quando se utiliza esse dado para gerar informações e efetuar análises, pois condiciona a resolução e qualidade do produto? Existe ainda a questão relacionada à confiabilidade destes dados. Uma verificação em campo poderia resolver a questão da checagem da acurácia desse dado, bem como, a validade e o grau de incerteza dessa informação. Percebe-se que ao utilizar um dado para gerar análises sem considerar sua qualidade o usuário corre o risco de acabar com um conjunto muito maior de dúvidas do que certezas. Além disso, existe ainda uma questão maior que é se a qualidade do dado é adequada para o propósito do usuário. Para responder a essa questão é essencial ter consciência da qualidade de todos os dados que estão sendo associados na modelagem.

Resultados como os obtidos na Seção 4.5 demonstram que é necessário se repensar no papel da fonte de dados. No Brasil, existem poucas fontes de dados oficiais que possuem alta resolução espacial. E como é de consenso geral, sabe-se que é possível gerar dados com menor resolução espacial a partir de dados com maior resolução espacial. Porém o contrário não é possível, a não ser por algum tipo de fusão, utilizando-se de dados auxiliares, ou por interpolação pura e simples.

Nesse contexto, por se utilizar informações multiescalares para a modelagem do índice de fragilidade ambiental, a discussão da qualidade de cada dado e sua influência no modelo, é essencial para verificar a adequabilidade de cada tipo de

dado. Exemplificando, se utilizar uma ortofoto para atualizar as análises ambientais, considerando que essa possua uma resolução de 5m, e seja utilizada para gerar novos dados de ação antrópica, cobertura vegetal e APP, ou seja, esses três parâmetros possuíram, se associar uma incerteza ao dado, resolução de 5m e o restante das informações possuam uma resolução de 10 m. Considere para realizar a modelagem utilizando esses dados matriciais haverá a necessidade de uniformizá-los, qual seria a forma mais adequada?

Primeiramente, cada parâmetro deve ser analisado separadamente, questões como o comportamento do fenômeno devem ser consideradas. Por exemplo, dentro de uma pequena área (5.000m^2), a cobertura vegetal pode mudar bruscamente, já o clima tende a ser constante para a maior parte dos casos. Então, se não houvesse mais nenhum parâmetro, além desses, para serem correlacionados, e a cobertura vegetal possuísse resolução espacial de 5m e a do clima 2500m, considerar a resolução da cobertura vegetal associada a um fator de incerteza seria aceitável, poderiam ser gerados dados com 10 m de resolução. O que implicaria em degradar a resolução da cobertura vegetal e ao mesmo tempo se interpolaria os dados de clima. Nessa pesquisa os resultados gerados possuem resolução espacial de 10 m.

No entanto, na prática fazer essas análises não é simples, pois as análises ambientais envolvem não dois parâmetros, mas vários, com comportamentos muito distintos, com resoluções características. E além dessas constatações ainda haveria a implicação da escolha adequada de um interpolador.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi elaborada neste trabalho uma nova metodologia visando a determinação de índices de fragilidade ambiental, uma área bastante complexa por envolver sistemas dinâmicos. A geração de um novo modelo matemático foi embasada em modelos propostos por Ross e Crepani, ambos desenvolvidos a partir dos estudos de Tricart (1977) sobre unidades ecodinâmicas.

Com relação aos aspectos ambientais esta tese conseguiu gerar uma modelagem promissora, que possui capacidade de identificar áreas mais detalhadas de maior índice de fragilidade ambiental que a metodologia de Ross e Crepani. Demarcando áreas de possíveis ameaças que podem atingir bacias hidrográficas. Para isso utilizou informações advindas de diversas fontes, destacando-se entre elas as Ciências Geodésicas.

Além da modelagem IFA verificou-se a possibilidade de desenvolver um sistema especialista baseado em informações georreferenciadas para determinação de índices de fragilidade ambiental, no qual um usuário sem qualquer intimidade com cartografia consegue gerar informações relevantes para políticas de gestão e planejamento ambiental através de mapas temáticos.

A validação da modelagem utilizando comparações com análises de especialistas in loco, questionários e comparação com modelos existentes, foi de grande valia, pois permitiu verificar se existia alguma deficiência nas ponderações dos parâmetros adotados e trouxe mais credibilidade ao modelo matemático proposto na pesquisa.

As comparações entre diferentes entradas de parâmetros foram essenciais para a modelagem de fragilidade ambiental relacionando tanto a dinâmica dos elementos naturais, bem como as ações antrópicas. Estabelecendo uma correlação dos processos e da dinâmica natural do ambiente em estudo, como a dinâmica, processos e consequências da ação humana sobre esses ambientes. Já que ambos determinam o equilíbrio ou desequilíbrio ambiental.

E por fim, frisa-se que a determinação dos índices de fragilidade ambiental de cada área por si só não tem qualquer finalidade, o importante é que esses resultados sirvam de subsídios para a gestão territorial de maneira planejada e sustentável, proporcionando uma maior agilidade no processo de tomada de

decisões e evitando a ocupação desordenada, trazendo maior qualidade de vida as populações e preservação ambiental de áreas em risco. Pois, a delimitação das áreas de maior índice de fragilidade é essencial para os órgãos públicos organizarem dispositivos legais de zoneamento visando melhorar a qualidade de vida em áreas urbanizadas e buscarem realizar planejamento de áreas para crescimento urbano futuro sem impactar negativamente o meio ambiente. Além de permitir a busca de soluções para áreas pontuais dentro de centro urbanos, e implementação de políticas direcionadas para as áreas mais sensíveis, tornando as ações mais efetivas.

Quanto às recomendações para a continuação dos trabalhos têm-se:

- Aplicação do índice Kappa para verificar a qualidade dos dados gerados.
- Implementação dentro do sistema especialista do modelo de fragilidade utilizando redes neurais artificiais (RNAs) empregando a metodologia proposta por Spörl.
- Implementação da avaliação de qualidade de dados utilizando lógica fuzzy para obter uma maior confiabilidade nos dados gerados e disponibilização dessas informações de qualidade nos relatórios finais.
- Implementar tutoriais ou ferramentas de ajuda ao sistema.
- Estudo e implementação de diferentes métodos de segmentação e classificação de imagens direcionadas a diferentes entradas de dados (por exemplo, imagens CBERS, dados laser, etc.) dentro do sistema.
- Estudo e implementação no sistema especialista de uma análise de autocorrelação espacial para análise de séries temporais dos índices de fragilidade ambiental para uma mesma bacia.
- Estudo e adequação para otimizar a interação usuário e interface.
- Estudo e implementação no sistema da geração de mapas em diferentes escalas através de generalização cartográfica.
- Estudo e discussão da associação de entradas de dados em diferentes referenciais geodésicos.

6. REFERÊNCIAS

ALCAMO, J.; ASH N. J.; BUTLER C. D.; CALLICOTT J. B.; CAPISTRANO, D.; CARPENTER, S. R. ET AL.. **Ecossistemas e o Bem-estar Humano: Estrutura para uma Avaliação**. Relatório do Grupo de Trabalho da Estrutura Conceptual da Avaliação do Milênio dos Ecossistemas. World Resources Institute, 2003.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. – Brasília : ANEEL, 2002.

ARAKI, H. **Fusão de informações espectrais, altimétricas e de dados auxiliares na classificação de imagens de alta resolução espacial**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ARONOFF, S. **GIS: A management perspective**. WDL Publication, Otawwa, Canadá, 1995.

BERTOTTI, L.G. **Unidades de Paisagem: Problemas ambientais nos municípios de São José dos Pinhais, Mandirituba e Tijucas do Sul / PR**. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

BIGARELLA, j. j; MAZZUCHOWSKI, J. Z. **Visão integrada da problemática da erosão**. Livro Guia do III Simpósio Nacional de Controle da Erosão. Maringá, 1985.

BITTENCOURT, G. **Inteligência Artificial Ferramentas e Teorias**. 2ª Edição. Florianópolis, Editora da UFSC, 2001.

BOLLMANN, H.A. & EDWIGES, T. **Avaliação da qualidade das águas do rio Belém, Curitiba-PR, com o emprego de indicadores quantitativos e perceptivos**. Artigo. Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.13 - Nº 4 - out/dez 2008, 443-452

BOSCARDIN, C.R. **A gestão de bacias hidrográficas urbanas: a experiência de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Gestão Urbana) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.

BOTELHO, R.G.M.; SILVA, A.S. **Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental**. In: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. 1.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

BREWER, C. A. **ColorBrewer 2.0**. Software, Geography, Pennsylvania State University.2009.Disponível em <<http://colorbrewer2.org/>>. Acesso em fevereiro/2012.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333p.

CARDOSO, JP; Lopes, CRS; Queiroz, RS; Rosa, VA. **Um sistema especialista para apoio à decisão em exames ortopédicos de Ombro, Cotovelo e Punho**. IX Congresso Brasileiro de Informática em Saúde-CBIS; 2004 Nov 07-10; Ribeirão Preto; Brasil.

CENTENO, J. A. da S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Editora Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

CEREDA JUNIOR, A. **Análise de fragilidade ambiental com métodos multicritério - críticas e proposta metodológica**. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de São Carlos, UFSCAR, Brasil, 2011.

CLIPS. Disponível em <http://www.ghg.net/clips>

CHRISTOFOLETTI, A. **Condicionantes Geomorfológicos e Hidrológicos aos Programas de Desenvolvimento**. In: Análise ambiental: uma visão multidisciplinar. 2.ed. ver. e ampl. Org: TAUKE, S.M. – São Paulo: Editora da Universidade Paulista, 1995.

CHAUDHRY, O. Z. **Modelling Geographic Phenomena At Multiple Levels of Detail: A model generalisation approach**. Tese (DOCTOR OF PHILOSOPHY), UNIVERSITY OF EDINBURGH, Edinburgh, Scotland, 2011.

COELHO, V.B.N. **Processamento de consultas em bancos de dados geográficos ambíguos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação), COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

CORVALÁN, S.B. **Zoneamento ambiental da APA Corumbataí (SP) de acordo com critérios de vulnerabilidade ambiental**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, Rio Claro – SP, 2009.

COSTA, N. M. C. da; COSTA, V. C. da ; SANTOS, J. P. C. dos 2009 **Definição e Caracterização de Áreas de Fragilidade Ambiental, com Base em Análise Multicritério, em Zona de Amortecimento de Unidades de Conservação**. In: 12o Encontro de Geógrafos de América Latina - EGAL 2009, 2009, Montevideo - Uruguai. 12 Encontro de Geógrafos de América Latina - Caminando en una América Latina en transformación, 2009.

CREPALDI, P. G.; AVILA, R.N.P.; Oliveira, J.P.M.; RODRIGUES, P.R. e MARTINS, R.L. **Um estudo sobre a árvore de decisão e sua importância na habilidade de aprendizado**. Artigo. Revista Eletrônica S@ber. Vol. 1 nº 1 nov./2006. ISSN 1980-5969.

CREPANI, E.; MEDEIROS, JS; AZEVEDO, L.C.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.; BARBOSA, C. **Sensoriamento Remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial**. INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2001.

CREPANI, E.; MEDEIROS, JS; AZEVEDO, L.C.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO. **Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. INPE, São José dos Campos, São Paulo, 1996.

CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. **Avaliação e perícia ambiental**. 6ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

CUNHA, S.B; GUERRA, A.J.T. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. In: GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. Bertrand Brasil, 4ª ed. Rio de Janeiro- RJ, 2003.

CUNHA, S.B; GUERRA, A.J.T. **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**. . Bertrand Brasil, 2ª ed. Rio de Janeiro- RJ, 1995.

DEVILLERS, R.; BEDARD, Y.; JEANSOULIN. Fundamentals os Spatial Data Quality. Ebook. Chippenham, Wilshire, 2006. Disponível <
<http://books.google.com.br/books?id=WOkmngcSLpkC&lpg=PA193&dq=spatial%20Data%20Quality%20semant&hl=pt-BR&pg=PA4#v=onepage&q=spatial%20Data%20Quality%20semant&f=false>>. Acessado em 10/12/2012.

Dicionário Aurélio. Disponível: <<http://www.dicionariodoaurelio.com/>>. Acessado em: outubro de 2010.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em <
<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoVarzeaTropical/glossario.htm#l>>. Acesso: 10/01/2013.

ERVIDEIRA, A. **Qualidade de dados num S.I.G.** Apostila PEG Engenharia Geográfica e Geoinformática. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – Departamento de Matemática. 2010. Disponível em <
http://ervideira.com.sapo.pt/PDFs/FSIG_Qualidade_dos_Dados.pdf>. Acessado em 02/01/2013.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Manual de Campo para la Ordenacion de Cuencas Hidrográficas. **Estudio y Planificacion de Cuencas Hidrográficas**. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. Roma, 1992. Disponível em <
<http://www.fao.org/docrep/006/T0165S/T0165S00.HTM>>. Acessado em 31/07/2102.

FEIGENBAUM, E.; BUCHANAN, B.; LEDERBERG, J. **On generality and problem solving: a case study using the dendral program**. In: MACHINE INTELLIGENCE, 1971, Edinburgh, GB. Anais. Edinburgh University Press, 1971. v.6, p.165–190.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geostatístico por indicação**. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - INPE, São José dos Campos, 2001.

FERNANDES, E.N.; FERNANDES FILHO, E.I.; SILVA, E.; SILVA, C.A.B. DA; RICARDO, J.F. **EROSYS: Sistema de apoio ao processo de avaliação de impactos ambientais de atividades agropecuárias**. Artigo. Revista Brasileira de Agroinformática, v. 4, n. 1, p. 1-12, 2002.

GIBOSHI, M.L.; RODRIGUES, L.H.A.; LOMBARDI NETO, F. **Sistema de suporte à decisão para recomendação de uso e manejo da terra**. Artigo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, DEAg/UFCG, v.10, n.4, p.861-866, 2006.

GOODCHILD, M. F. **Spatial Autocorrelation. Concepts and Techniques in Modern Geography**. University of Western Ontario, London, Ontario, Canada. Published by Geo Books, Norwich, 1986.

GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. In: GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. Bertrand Brasil, 4ª ed. Rio de Janeiro- RJ, 2003.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1999.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em <<http://www.inpe.br>>. Acessado em 12 de janeiro de 2012.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. Órgão executivo gestor do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SEGRH/PR. Disponível em <<http://www.aguasparana.pr.gov.br>>. Acessado em 5 de janeiro de 2012.

JESEN, 2009. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphany (coordenador)...[et al.]. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009.

JESS. Disponível em <<http://www.jessrules.com/>>

JONES, C. **Geographical Information Systems and Computer Cartography**. Addison Wesley Longman Ltd., Harlow, 1997.

LANNA, A.E.L. **Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília: IBAMA, 1995.

LAZZAROTTO, D. R. **Avaliação da qualidade de base cartográfica por meio de indicadores e sistema de inferência fuzzy**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LEANDRO, D.; HUINCA, S.C.M.; KRUEGER, C.P.; CENTENO, J.A.S. **Ciências geodésicas na geração de subsídios para planejamento e gestão das zonas costeiras**. Artigo. Geografia Ensino & Pesquisa, v. 15, n.2, maio./ago. 2011.

LEITE, M. **Técnicas de programação: uma abordagem moderna**. Brasport, Rio de Janeiro, 2006. e-book. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=H8A0lZtqaXsC&lpg=PA168&dq=%C3%A1rvore%20de%20decis%C3%A3o&hl=pt-BR&pg=PR4#v=onepage&q=%C3%A1rvore%20de%20decis%C3%A3o&f=false>>. Acesso em: 10/08/2012.

LUGER, G.F. **Inteligência Artificial: estruturas e estratégias para a solução de problemas complexos**. Bookman, 4 ed, São Paulo, 2002. e-book. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=h2GJLP6jQ4kC&lpg=PA352&dq=%C3%A1rvore%20de%20decis%C3%A3o&hl=pt-BR&pg=PR5#v=onepage&q=%C3%A1rvore%20de%20decis%C3%A3o&f=false>>. Acesso em: 10/08/2012.

LUZ, N. B. da. **Integração de análise de imagens orientada a objetos e árvores de decisão para a classificação de subtipologias da Floresta Ombrófila Mista**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Universidade do Paraná, UFPR, Curitiba, 2011.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHUARI, A.; ROSS, J. L. S. **Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, abril 2005, Goiânia-Go. Anais. São José dos Campos INPE, 2005. p. 2203-2210.

KOBIYAMA, M; MOTA, A.; CORSEUIL, C. W. **Recursos hídricos e saneamento**. Curitiba-PR: Ed. Organic Trading, 2008.

MACEDO, R. K. de. **A importância da avaliação ambiental**. In: **Análise ambiental: uma visão multidisciplinar**. 2.ed. ver. e ampl. Org: TAUKE, S.M.; Gabbi, N; Fowler, I.G. – São Paulo: Editora da Universidade Paulista, 1995.

MEGIATO, E. I. **Análise Ambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas, RS**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil. 2011.

MELO, O. A. G. **Análise Comparativa da fragilidade Potencial e Emergente da bacia hidrográfica do rio Baiano-Assis Chateaubriand/Pr**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual de Maringá, UEM, Brasil, 2010.

MENEZES, P. M. L E COELHO NETO, A L. **Escala: Estudo de Conceitos e Aplicações**. In: Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, Recife, P.E., CD Rom, 1999

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em março de 2010.

MOREIRA, I.V.D. **Vocabulário Básico de Meio Ambiente**. Compilado por Iara Verocai Dias Moreira – Rio de Janeiro: Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, 1990.

MORSELLO, C. **Áreas Protegidas Públicas e Privadas – Seleção e Manejo**. São Paulo: Annablume: Fapesp, 2001.

MTALO, E.G. & DERENYI E. **A knowledge based approach to the management of soil erosion information in Developing countries**. Department of Surveying Engineering. University of New Brunswick. Fredericton, N.B. CANADA. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. ISPRS Archives - Volume XXIX. 1993.

NAGI, R. **On map scale and raster resolution**. Artigo. 2010 Disponível em <<http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2010/12/12/on-map-scale-and-raster-resolution/>>. Acessado em 12/12/2012.

NEGNEVITSKY, M. **Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems**. Second Edition. England, Addison-Wesley, 2005.

NOVAK JR, G. S. **TMYCIN Expert System Shell**. University of Texas at Austin. Disponível em <<http://userweb.cs.utexas.edu/~novak/tmycinb.html>> Acessado em: 1 de abril de 2010.

OOSHAKSARAIE, L.; BASRI, N. E. A.; BAKAR, A. A.; MAULUD, K. N. A. **An Expert System Prototype for Minimizing Soil Erosion on Construction Site in Malaysia**. European Journal of Scientific Research. Vol.33 No.3 (2009), pp.454-460. EuroJournals Publishing, Inc. 2009.

PALMIERI, F. & LARACH, J.O.I. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. In: GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. Bertrand Brasil, 4ª ed. Rio de Janeiro- RJ, 2003.

PEREIRA, J.B.S. & ALMEIDA, J. R. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. In: GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. Bertrand Brasil, 4ª ed. Rio de Janeiro- RJ, 2003.

PHILIPPI Jr., A.; ROMÉRO, M. de A.; BRUNA, G.C. **Curso de Gestão Ambiental**. Ed. Manole, Barueri, SP, 2004.

PIO, F. V.; CANCIAN, M. H.; FRANÇA, R. B. **JESS – The Rule Engine for the Java™ Platform**. Disponível em: <http://www.das.ufsc.br/~gb/pg-ia/Jess07/das6607-francesca-maiara-ricardo.pdf>. Acesso em: 6 de abril de 2010.

PY, M. X. **Sistemas Especialistas: uma introdução**. Instituto de Informática - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002. Disponível em <<http://www.inf.ufrgs.br/gppd/disc/cmp135/trabs/mpy/sistemasespecialistas.pdf>>. Acessado em 21 de janeiro de 2010.

PRADO, S. D. **Inteligência Artificial**. Apostila da disciplina de Inteligência Artificial, UNESP – Faculdade de Ciências, 2004.

PROJETO ÁGUAS DO AMANHÃ. Relatório: **Um olhar crítico sobre a Bacia Hidrográfica do Alto Iguaçu**. Vol. I, 2011.

RESOLUÇÃO Nº 303, DE 20 DE MARÇO DE 2002. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30302.html>>. Acessada em: 2 de março de 2010.

RAMOS, A; CIFUENTES, P; GONZÁLEZ, S.; MATAS, ESPASA CALPE, S. A. **Diccionario de la naturaleza**, Madrid: Espasa Calpe, 1987

RABUSKE, R. A. **Inteligência artificial**. Editora da UFSC. 1995

RESCK, D.V.S. **Manejo e Conservação do Solo em Microbacias Hidrográficas**. Planaltina: Embrapa – PAC, 1992.

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**. Barueri, SP, Editora Manole, 2005.

RICH, E.; KNIGHT, K. **Inteligência artificial**. 2 ed. São Paulo: Makron Books, 1993.

ROSA, D. de la; MAYOLA, F.; MORENOA, J.A.; BONSONB, T.; LOZANOB S. **An expert system/neural network model (ImpelERO) for evaluating agricultural soil erosion in Andalusia region, southern Spain**. Artigo. Agriculture, Ecosystems & Environment. Volume 73, Issue 3, May 1999, Pages 211-226.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. In: GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. Bertrand Brasil, 4ª ed. Rio de Janeiro- RJ, 2003.

ROSS, J. L. S. **Análise e síntese na abordagem geográfica da pesquisa para o planejamento ambiental**. Revista do Departamento de Geografia. São Paulo, n. 9, 1995.

ROSS, J. L. S. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados**. Revista do Departamento de Geografia. São Paulo, n. 8, 1994.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia Ambiente e Planejamento**. 2º ed. São Paulo:Contexto, 1991.

RUTKOWSKI, L. **Computational Intelligence Methods and Techniques**. Editora Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

SALA, M. G. **Indicadores de fragilidade ambiental na Bacia do Ribeirão Maringá-PR**. Dissertação (Mestrado em Geografia Análise Regional e Ambiental.

Universidade Estadual de Maringá – UEM. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Departamento de Geografia. 2005.

SANTOS, R. F. dos. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficinate Textos, 2004.

SCHWABE, D. & CARVALHO, R.L. de. **Engenharia de Conhecimento e Sistemas Especialistas** - Edição Preliminar - Editora Kapelusz - EBAI, 1987.

SETTI, A.A. ET al. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2ª Ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Agência Nacional de Águas, 2001.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. **Análise empírica da fragilidade potencial e emergente da Bacia do Rio Cubatãozinho**, Estado do Paraná. Revista Caminhos da Geografia. Instituto de Geografia UFU, Uberlândia v. 8, n. 22 set/2007 p. 1 – 17.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A.P.; OKA-FIORI, C. **Estudo das unidades ecodinâmicas de instabilidade potencial na APA de Guaratuba: subsídios para o planejamento ambiental**. Artigo. Boletim Paranaense de Geociências, n. 57, p. 9-23, 2005. Editora UFPR.

SCHMIDT, M. A. R. **Uso de mapas 3D para navegação virtual: uma abordagem cognitiva**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

SHIAVETTI, A. & CAMARGO, A.F.M. **Conceitos de Bacias Hidrográficas: Teorias e Aplicações**. Editus, Ilhéus –Bahia, 2002.

SHORTLIFFE, E. **Computer-Based Medical Consultations : MYCIN**. New York: American Elsevier, 1976.

SOUTO, K. C. **Sistema Especialista com Lógica Nebulosa para o cálculo em tempo real de indicadores de desempenho e segurança na monitoração de usinas nucleares**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Nuclear) , Universidade do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. Tese (Doutorado em Geografia Física), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. **Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos**. Artigo. GEOUSP - Espaço e Tempo, n. 15, p. 39-49, 2004.

STEYAERT, L. **A perspective on the state of environmental simulation modeling**. In: Goodchild, M. F.; Bradley, O. P.; Steyaert L. T. ed. Environmental Modeling with GIS. New York: Oxford University Press, 1993. p. 16-30.

SUDERHSA. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Relatório de Diagnóstico: **Plano da Bacia do Alto Iguaçu e afluentes do Alto Ribeira**. 2007. Disponível em <http://www.recursoshidricos.pr.gov.br/arquivos/File/COALIAR/Publicacoes/plano_de_bacias/cap01_apresentacao.pdf>. Acessado em 4 de SETEMBRO de 2012.

TAGLIANI, C.R.A. **Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações**. Artigo. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 1657 – 1664. Acessado em <<http://www.praia.log.furg.br/Publicacoes/2003/2003c.pdf>>. Disponível em 02/01/2013.

TOBLER, W. 1987. “**Measuring Spatial Resolution**”, Proceedings, Land Resources Information Systems Conference, Beijing, pp. 12-16.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977.

VETTORAZZI, C. A. **Avaliação Multicritérios, em ambiente /sig, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos**. Tese (Livre Docência) Departamento de Engenharia Rural, USP – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba, 2006.

VIEIRA, A. J. B.; CARVALHO, C. A. P.; SLUTER, C. R. **Modelagem espaço-temporal de fenômenos topográficos: uma revisão didática**. Artigo. Pesquisas em Ciencias Geodésicas. Série em Ciências Geodésicas, vol 2. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

XAVIER-DA-SILVA, J. . **Geoprocessamento para análise ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: D5 Produção Gráfica, 2001. v. 1. 228 p.

WALLEY, P. **Measures of uncertainty in expert systems**. Artificial Intelligence 83, 1996.

WATERMAN,D.A. **A Guide to expert systems**. Addison-Wesley Publishing Company,1986.

WEBER, E. et al. **Qualidade de dados geoespaciais**. Porto Alegre: Instituto de Informática. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 37p. Relatório de Pesquisa - RHAE / CNPq – RP-293.

YE, N. **The Handbook of data mining**. New Jersey: Lawrence Erlbaum, 2003. e-book. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=tABuaqVTf3MC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 18/08/2012.

7. REFERÊNCIAS CONSULTADAS

ANTUNE, J. **Modelo de avaliação de risco de controle utilizando a lógica nebulosa**. Tese (Doutorado em Contabilidade e Controladoria). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ATIG/SUDERHSA. **Bacias Hidrográficas do Paraná**. Mapa, 2007.

BARROS, E. O.; MACIEL, G. F.; MAIA, F. G.; SCHMIDT, G. **Caracterização fisiográfica da microbacia hidrográfica do Córrego Tiúba, Município de Palmas**. In: AIDIS. Forjando el Ambiente que Compartimos. San Juan, AIDIS, Ago. 2004.

BIONDI NETO, L.; COELHO, P. H. G.; AMARAL, J. L. M. DO; MELLO, M. H. C. S. **Minicurso de Sistema Especialista Nebuloso**. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Pesquisa Operacional na Sociedade: Educação, Meio Ambiente e Desenvolvimento. Goiânia, GO, 2006.

CAVALCANTI, C. **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma sociedade sustentável**. INPSO/FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais, Fundação Joaquim Nabuco, Ministério de Educação, Governo Federal, Recife, Brasil. 1994.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Edgard Blücher, 4ª Edição, São Paulo, 2007.

CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia do Brasil**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

DANTAS, A. R. **Sistemas Especialistas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento da Ciência da Computação - Lógica em Programação – Dezembro de 2000.

DEVILLERS, R.; BEDARD, Y.; JEANSOULIN. **Multidimensional Management of geospatial data qualitt information for its dynamics use within GIS**. Artigo. Journal of the american society for photogrammetry and remote sensing, Vol. 71, No. 2, February 2005, pp. 205–215.

FISCHLER, M. A. *Intelligence: the eye, the brain, and the computer*. Addison-Wesley, 1987.

GIARRATANO, J. C. **The CLIPS User's Guide**. 1998.

GORAKSHKAR, V. **Conflitos e a administração de uma bacia fluvial. 2005. Tearfund International Learning Zone**. Disponível em: <<http://tilz.tearfund.org/>>. Acessado em 24 de setembro de 2010.

GORDON, J. & SHORTLIFFE, E. H. **The Dempster-Shafer Theory of Evidence**. In: **Rule-based expert systems**. New York, Addison-Wesley, 1984.

GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. **Avaliação e Perícia Ambiental**. In: GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. Bertrand Brasil, 6ª ed. Rio de Janeiro- RJ, 2005.

IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná. Disponível em <<http://www.iapar.br>>. Acessado em outubro de 2010.

LAERHOVEN, K. V. **Comparison of the CLIPS and JESS expert system shells**. Project report for Industrial Applications of AI. 1999. Disponível em <<http://www.comp.lancs.ac.uk/~kristof/research/notes/clipsvsjess/index.html>>. Acessado em: 05 outubro de 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Programa nacional de microbacias hidrográficas: manual operativo**. Brasília: Comissão Nacional do PNMH, 1987.

MOTA, S. **Preservação e conservação de recursos hídricos**. 2.ed.Rio de Janeiro: ABES,1995.

MÜLLER-PLANTENBERG, C. & AB'SABER, A. N. **Previsão de Impactos Ambientais**. Edusp –Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

PASSOS, A. **Sistema especialista aplicado à assistência técnica: estudo de caso em uma organização fabricante de produtos de telecomunicações**. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, fevereiro de 2005.

PEREIRA, S.C.A. **Tratamento de Incertezas em Modelagens de Bacias**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

SOUSA; R. V. **Robô Agrícola Móvel (RAM): Uma arquitetura baseada em Comportamentos hierárquicos e difusos para sistemas autônomos de guiagem e navegação**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

TRZESNIAK, P. **Indicadores Quantitativos: Reflexões que Antecedem seu Estabelecimento**. Ci. Inf., Brasília. V.27, n.2, p.159-164, mai/ago 1998.

VILLAS, M. V. et al. **Estrutura de dados**. Editora Campos. Rio de Janeiro.1993

WULDER, M. A.; WHITE, J. C.; COOPS, N. C.; NELSON, T.; BOOTS, B. **Using local spatial autocorrelation to compare outputs from a forest growth model**. Paper. Ecological Modelling 209 (264-274), 2007. Disponível em <http://geog.uvic.ca/spar/papers/Wulder_2007_EM_209.pdf>. Acessado em 08/08/2012.

WINOGRAD, T. **Inteligência Artificial: Existem dois pontos de partida para definir a I.A. - sonho e tecnologia**. Disponível em: <http://www.citi.pt/educacao_final/trab_final_inteligencia_artificial/ia.html>. Acessado em 6 de abril de 2010.

8. APÊNDICES

Esta seção contém os comentários sobre os dados contidos no DVD anexado a este volume, assim como as instruções para uso e instalação do protótipo de sistema especialista para determinação de índices de fragilidade ambiental desenvolvido nessa pesquisa e os mapas temáticos gerados. Os apêndices 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6 e 8.7 contêm modelo do questionário de pesquisas, imagens e gráficos de todas as bacias e áreas testes utilizadas no desenvolvimento do trabalho que não foram inseridas no corpo da tese.

Quanto ao protótipo de sistema especialista foi desenvolvido na linguagem de programação Delphi, e é compatível com o sistema operacional Windows XP. Para iniciar o uso, siga as seguintes instruções:

- 1- Copiar do DVD a pasta IFA e todo o seu conteúdo para a unidade C: do seu computador
- 2- Essa pasta contém o arquivo Pro_IFA.exe que iniciará o programa (Figura 34).
- 3- Escolha a opção Bacia existente e o modelo que deseja aplicar, sequencialmente o programa gerará um mapa de índice de fragilidade ambiental para a bacia escolhida (Figura 35).

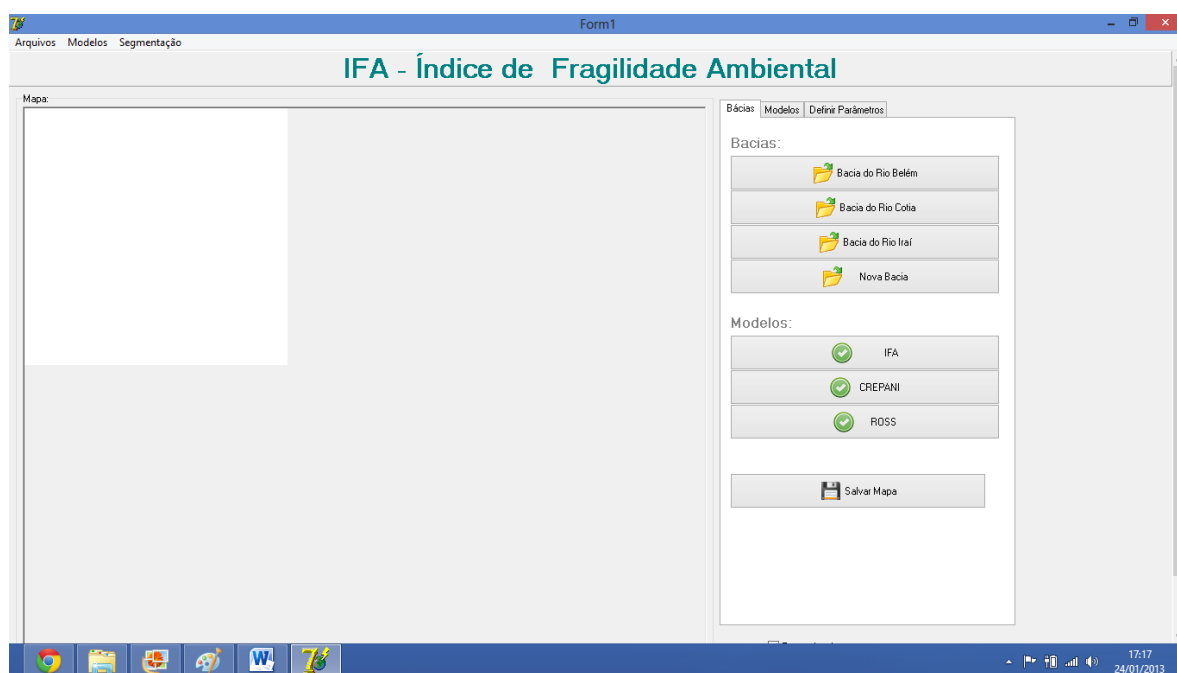


FIGURA 34 – TELA INICIAL DO PROGRAMA IFA.
FONTE: Autora (2013)

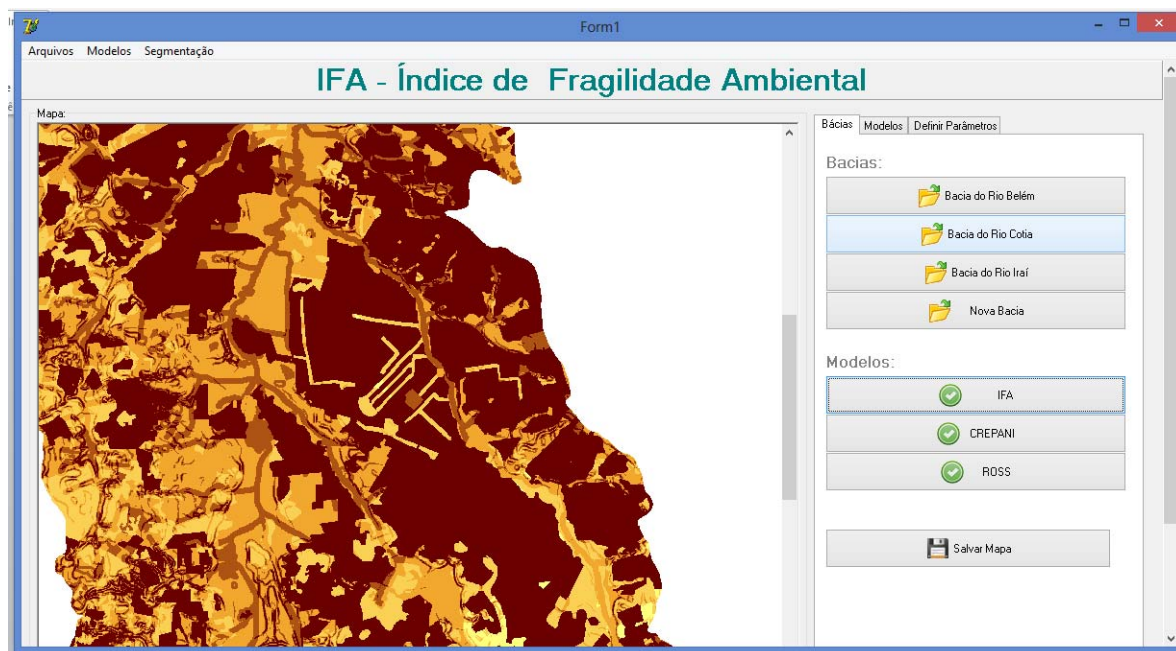


FIGURA 35 – PROGRAMA IFA MODELO IFA APLICADO A BACIA DO RIO COTIA
 FONTE: Autora (2013)

Descriminação dos apêndices:

- 8.1 FORMULÁRIOS AUXILIARES A ANÁLISES IN LOCO
- 8.2 MODELO DE QUESTIONÁRIO
- 8.3 RESULTADOS DOS QUESTIONÁRIOS
- 8.4 MAPAS DAS 12 ÁREAS TESTES E SUAS CLASSIFICAÇÕES NA MODELAGEM IFA
- 8.5 MAPAS COM A COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES MODELOS EXISTENTES
- 8.6 MAPAS DE CONTRIBUIÇÃO DE CADA CRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL
- 8.7 MAPAS DAS VARIAÇÕES DE ESCALA DE DADOS NO MODELO
- 8.8 MAPAS GERAIS
- 8.9 PROTÓTIPO DO SE IFA
- 8.10 ESTUDOS PRELIMINARES